



UNIVERSITY OF LUND

LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF TRAFFIC PLANNING AND ENGINEERING

1975

BULLETIN 11

ARNE HANSSON

STUDIES IN DRIVER BEHAVIOUR, WITH APPLICATIONS
IN TRAFFIC DESIGN AND PLANNING. TWO EXAMPLES

BILAGA 2 TRAFIKAVVECKLING I KORSNINGAR
UTAN SIGNALREGLERING



TRAFIKTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND
FACK 725
S- 220 07 LUND SWEDEN

FÖRORD

Föreliggande rapport utgör en bilaga till huvudrapporten "Studies in driver behaviour, with applications in traffic design and planning. Two examples". Tekniska Högskolan i Lund Bulletin nr 3 1976.

STUDIES IN DRIVER BEHAVIOUR, WITH APPLICATIONS IN TRAFFIC DESIGN AND PLANNING. TWO EXAMPLES

Bilaga 2 Trafikavveckling i korsningar utan signalreglering *Traffic flow at uncontrolled intersections*

Arne Hansson

Malmö 1 oktober 1976

Arne Hansson

STUDIES IN DRIVER BEHAVIOUR, WITH APPLICATIONS TO HIGHWAY DESIGN AND
PLANNING. TWO VOLUMES.

Bliss S
Interpreting the changes in signalizing
traffic flow as controlled intersections

Arne Hansson



FÖRORD

Föreliggande rapport utgör en bilaga till huvudrapporten "Studies in driver behaviour, with applications in traffic design and planning. Two examples", Tekniska Högskolan i Lund Bulletin nr 9 1975.

I denna bilaga diskuteras modeller för trafikavvecklingen i plan-korsningar utan signalreglering. Därvid beaktas främst sådana mått på korsningens funktion, som är väsentliga vid dimensionering (kapacitet, fördröjning etc). De diskuterade modellerna utgår från hypoteser avseende trafikantbeteendet. I rapporten redovisas mätresultat avseende olika parametrar som beskriver detta beteende, främst det s k kritiska tidsavståndet.

Det redovisade arbetet har utförts inom ramen för den s k kapacitetsutredningen vid Statens Vägverk, vilken påbörjades 1971. Väsentliga delar av resultaten har tidigare presenterats inom denna utredning. Projektledare för utredningen är avdelningsdirektör Erdem Imre och utredningsman professor Stig Nordqvist, under den aktuella tiden också assisterad av Dr Karl-Lennart Bång. Förutom till de nämnda, som i avgörande grad möjliggjort detta arbete, står författaren i tacksamhetsskuld till ett stort antal andra personer vid Statens Vägverk och vid AB Vattenbyggnadsbyrån (VBB), samt till professor Gösta Lindhagen och övrig personal vid Institutionen för Trafikteknik, LTH.

Malmö i oktober 1975

Arne Hansson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

BETECKNINGAR	i
SAMMANFATTNING	ii
SUMMARY	iii
1. BAKGRUND, SYFTE OCH OMFATTNING	1
2. ALLMÄNNA FÖRUTSÄTTNINGAR	2
2.1 Mått på kapacitet och framkomlighet	2
2.2 Översikt över inverkande faktorer	4
2.3 Befintliga beräkningsmetoder	7
3. ACCEPTERADE TIDSAVSTAND	8
3.1 Inledning	8
3.2 Definitioner	8
3.3 Litteraturöversikt	12
3.4 Fältmätningar	14
3.4.1 Bakgrund och syfte	14
3.4.2 Urval av mätplatser	15
3.4.3 Mätförfarande	16
3.4.4 Bearbetningsmetod	17
3.4.5 Resultat	19
3.5 Slutsatser	21
4. ANSATSER TILL EN BERÄKNINGSMODELL	24
4.1 Översikt	24
4.2 Beskrivning av konfliktsförhållanden	25
4.3 Modeller för den enkla interaktionen	26
4.3.1 Beräkning av betjäningstid och kapacitet	26
4.3.2 Beräkning av väntetid	29
4.3.3 Beräkning av kölängd och andel stopp	31
4.4 Modifiering m h t överlagrade interaktioner	32
4.4.1 Inverkan av flera överordnade fordonsströmmar	32
4.4.2 Inverkan av fordonsströmmar som är både över- och underordnade	33
4.4.3 Inverkan av flera underordnade fordonsströmmar	34
4.5 Sammanfattning av beräkningsmodellen	35
4.6 Några empiriska resultat	36

LITTERATURFÖRTECKNING

38

- APPENDIX 1. Beskrivning av mätplatser
 2. Beskrivning av mätförfarande
 3. Beskrivning av bearbetningsprogram

B E T E C K N I N G A R

a kritiskt tidsavstånd

 $a_g = \text{"gap"}$ $a_l = \text{"lag"}$ $a_f = \text{följdtid}$

B belastningsgrad

c variationskoefficient

d fördröjning

 $d_b = \text{betjäningstid}$ $d_f = \text{fördröjning under körning}$ $d_k = \text{kötid}$ $d_v = \text{väntetid}$

f() frekvensfunktion

G() fördelningsfunktion

h tidsavstånd

 $h_u = \text{tidsavstånd i underordnat flöde}$ $h_o = \text{tidsavstånd i överordnat flöde}$

K kapacitet

N antal fordon i kö

P sannolikhet, andel

 $P_s = \text{andel stoppade fordon}$ $P_N = \text{sannolikhet för N fordon i kö}$

q flöde

 $q_u = \text{underordnat flöde}$ $q_o = \text{överordnat flöde}$ Medelvärde anges med streck över resp beteckning (t ex $\bar{d}$).

SAMMANFATTNING

Vid dimensionering av korsningar erfordras samband mellan å ena sidan sådana mått på trafikavvecklingens kvalitet som kapacitet, fördröjning och kölängd, å andra sidan olika inverkande faktorer. För korsningar utan signalreglering är antalet sådana faktorer så stort att en direkt mätning av de nämnda sambanden blir i det närmaste ogörlig. Med hjälp av en teoretisk modell, baserad på trafikantbeteendet, kan antalet inverkande faktorer reduceras till ett litet antal mätbara parametrar.

Den viktigaste av dessa parametrar är det kritiska tidsavståndet. För att bestämma det kritiska tidsavståndet och dess beroende av främst korsningens utformning och reglering genomfördes dels en litteraturinventering, dels fältmätningar. De senare avsåg 18 olika korsningar i Sverige och genomfördes med hjälp av en höggradigt automatiserad datainsamlingsteknik. Resultaten visar en i huvudsak god överensstämmelse med tidigare mätningar. En uppskattning av de kritiska tidsavstånden för dimensioneringsberäkningar torde kunna göras med acceptabel precision.

Olika modeller för beräkning av kapacitet, fördröjning och kölängder diskuteras översiktligt. En köteoretisk modell, som möjliggör generalisering till olika typer av korsningar, förordas. Vissa jämförelser med empiriskt uppmätta värden tyder på att en sådan modell kan vara praktiskt användbar.

SUMMARY

In the process of designing at-grade intersections, several types of relationships are required. Among these are the dependencies of performance measures such as capacity, delay and queue length, on various factors of influence. For non-signalized intersections the number of such factors practically prohibit a direct measurement of the relationships mentioned. By using a theoretical model, based on road user behaviour, the number of factors can be reduced to a few parameters.

Most important of these parameters is the critical gap. In order to determine the critical gap and its dependence on (mainly) intersection design and control, a literature survey and a field study were carried out. The field study included 18 Swedish intersections and made use of a highly automatic data-collection technique. On the whole, the results agree well with those of previous studies. It is proposed that critical gaps can be estimated with a reasonable accuracy, for the purpose of design calculations.

Different models for calculating capacity, delay and queue length are discussed on an introductory level. A certain type of models, based on the theory of queues, is proposed and is shown to admit generalizations to different types of intersections. Certain comparisons with empirical data indicate that this type of models may be of use for practical applications.

1 BAKGRUND, SYFTE OCH OMFATTNING

Vid dimensionering av anläggningar för väg- och gatutrafik eftersträvas sådana utformningar, som minimerar de samhällsekonomiska kostnaderna. I dessa kostnader beaktas, förutom anläggnings- och driftskostnader, olika aspekter på trafikens framkomlighet och säkerhet, effekter för angränsande delar av trafikledsnätet samt för kringboende etc.

För praktiskt bruk måste denna allmänna målsättning formuleras i operationella mått, för korsningar t ex enligt följande tabell:

Aspekt	Mått
Anläggningskostnader	Kostnad (kr)
Driftskostnader	Årlig kostnad (kr/år)
Säkerhet	Antal olyckor per år eller trafikant ev av olika allvarlighetsgrader
Framkomlighet	Belastningsgrad (%)
	Medelfördröjning (s/f)
	Andel stoppade fordon (%)
Störningar för omgivande nät	Körlängd (m)
	Ändring i trafikarbete (fh/h)
Störningar för kringboende	Bullerstörningar
	Luftföroreningar (etc)

TABELL 1 Exempel på operationell beskrivning av aspekter som bör beaktas vid dimensionering av en väg- eller gatukorsning.

Vid sammanjämkningen av de olika måtten uppstår en mängd svårigheter, dels emedan flertalet storheter inte entydigt kan omvandlas till kronor, dels emedan effekterna drabbar olika kostnadsbärare (väghållaren, olika trafikslag etc). I praktiken beaktas därför många av måtten endast som gränsvärden i form av normer och riktlinjer, eller genom kvalitativa överväganden.

Föremål för kvantitativa beräkningar vid val av utformning av en korsning är förutom anläggnings- och driftskostnaderna ofta endast korsningens kapacitet (f/h) eller belastningsgrad (%). Med dess kapacitet avses därvid det största stationära trafikflödet som kan upprätthållas, vid vissa givna förhållanden och med dess belastningsgrad förhållandet mellan aktuellt flöde och kapacitet. Vid tätortsförhållanden blir korsningarnas kapacitet jämte längden på tillgängliga köutrymmen ofta av avgörande betydelse för framkomligheten i biltrafiknätet.

För beräkning av kapaciteten för olika typer av trafikaneläggningar har publicerats ett flertal metoder, av vilka Gators och vägars kapacitet (Nordqvist 1958) och Highway Capacity Manual 1965 är de i Sverige mest använda.

Med syfte att se över dessa beräkningsmetoder, mot bakgrund av senare forskningsresultat, samt på längre sikt att medge mer nyanserade dimensioneringsmetoder initierades 1971 en utredning inom Statens Vägverk, den s k kapacitetsutredningen. Första etappen av denna utredning, omfattande litteraturinventering och analys, publicerades 1973 (Statens Vägverk 1973). Det fortsatta arbetet med utveckling av beräkningsmetoder har redovisats successivt i form av PM.

I denna rapport har sammanställts de delar av kapacitetsutredningen, som berör plankorsningar utan signalreglering. Dessa typer av trafikaneläggningar är endast mycket översiktligt behandlade i nämnda befintliga beräkningsanvisningar, men svarar för en inte obetydlig del av trafikanternas tidsförluster vid färd i tätorter.

Möjligheterna till kvantitativa beräkningar av t ex kapacitet för sådana korsningar har avsevärt förbättrats under 1960- och 1970-talen, genom betydande insatser från ett flertal forskare (se t ex OECD 1973). De beräkningsmodeller som utvecklats är huvudsakligen av teoretisk natur.

Syftet med den föreliggande rapporten är dels att granska och kanske i något avseende utveckla de befintliga teoretiska beräkningsmodellerna, dels att redovisa mätresultat avseende vissa parametervärden för dessa modeller. Rapporten kan inte göra anspråk på fullständighet i den meningen att den utmynnar i en praktisk beräkningsanvisning, men bör kunna vara till ledning vid utformningen av en sådan anvisning.

Förutom kapacitet och belastningsgrad diskuteras även vissa närbesläktade mått på en korsnings funktion, som fördröjning, kölängder och andel stoppade fordon. Säkerhetsaspekter, som åtminstone vid landsbygdsförhållanden normalt är väl så väsentliga, har helt utelämnats. Av de behandlade korsningstyperna har tyngdpunkten lagts vid korsningar med skyltad stopp- eller väjningsplikt, medan korsningar med endast allmän högerregel endast behandlas marginellt. Växlingssträckor (t ex i cirkulationsplatser) och snedvinkliga anslutningar, som t ex i trafikplatser på motorvägar, har uteslutits. Slutligen behandlas korsningens funktion endast ur biltrafikens synpunkt, varvid förutsätts att inverkan av gång- och cykeltrafik på biltrafikens avveckling är liten.

2 ALLMÄNNA FÖRUTSÄTTNINGAR

2.1 Mått på kapacitet och framkomlighet

Begreppet kapacitet, som i vissa beräkningsmetoder kopplas till en viss lägsta standard i någon mening, reserveras här för ordets strikta, fysikaliska innebörd: det största stationära flödet som kan passera en given anläggning under givna omständigheter.

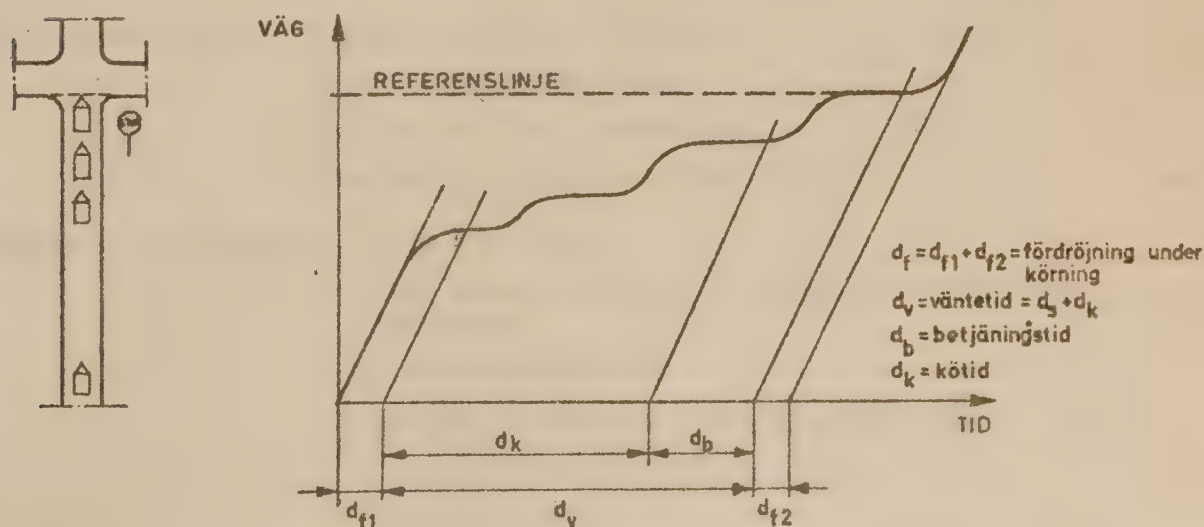
Kravet att flödet skall vara stationärt innebär därvid att om tillflödet till korsningen är konstant under en längre tid, men dock med vissa statistiska variationer i tidsavstånden mellan successiva fordon, så skall köerna i tillfarterna till korsningen inte oupphörligt växa utan förbli vid en i medeltal konstant längd.

I korsningar med signalreglering finns möjlighet att reglera tidssättningen av trafiksignalerna så, att belastningsgraderna och trafikanternas fördröjning blir av samma storleksordning i de olika tillfarterna. I korsningar med stopp- eller väjningsplikt kommer däremot, vid normala driftsförhållanden, all fördröjning att drabba trafik från vissa tillfarter (de underordnade tillfarterna), medan trafik från de överordnade tillfarterna inte hindras.

Kapaciteten för sådana korsningar bör därför anges separat för varje underordnad tillfart. De "givna omständigheterna" kommer då att inkludera flödet från övriga tillfarter i korsningen, förutom sådana variabler som beskriver olika andra trafikförhållanden (t ex andelar svängande fordon), korsningens utformning m m.

Termen framkomlighet används här av praktiska skäl som en sammanfattande benämning på de mått (exklusive säkerheten) vilka trafikanterna upplever som väsentliga vid färd: fördröjning, sannolikhet för stopp etc).

Det mest väsentliga av dessa framkomlighetsmått är fördröjningen, i relation till den hypotetiska färdtid som skulle erhållits om den korsande trafikleden saknats. Ur beräkningsteknisk synpunkt är det praktiskt att dela upp fördröjningen för fordon från en underordnad tillfart i två komponenter, väntetid resp fördröjning under körning. Med väntetid avses därvid den tid fordonen står stilla (inklusive framryckning inom en kö) och med fördröjning under körning retardations- och accelerationsförluster. Väntetiden kan vidare, med köteoretiska termer, uppdelas i dels betjäningstid (= tid först i kö), dels kötid. Innebörden av definitionerna illustreras av FIGUR 1 nedan.



FIGUR 1 Väg/tid-diagram för en underordnad tillfart, illustrerande fördröjningens komponenter.

Medan medelvärdet av fördröjningen, beräknat för en tillfart eller för korsningen som helhet, är av störst intresse vid t ex trafikekonomiska beräkningar så kan fördröjningens högre percentiler vara väl så intressanta ur trafikanternas synpunkt. För beräkning av dessa percentiler krävs kännedom inte bara om medelvärdet utan också om den statistiska fördelningen.

Andel fordon som tvingas stanna, i korsningar med väjningsplikt eller högerregel, kan vara ett kriterium på framkomligheten vid lägre belastningsgrader. Vid trafikekonomiska beräkningar bör beaktas att fordonskostnaderna beror på andelar stoppade fordon.

Kölängden i en tillfart är kanske något mindre väsentlig ur trafikantens synpunkt, men har stor betydelse vid praktiskt dimensioneringsarbete. Otillräckliga kömagasin kan t ex betyda att intilliggande korsningar blockeras med mycket stora fördröjningar som följd. Viktigare än medelvärdet är kölängdens högre percentiler, vilka för beräkning kräver kännedom om kölängdens statistiska fördelning.

Av de nämnda måtten (kapacitet, fördröjning, andel stannade fordon och kölängd) är fördröjningen det i viss mening mest "allmänna". Givet medelfördröjningen för en underordnad tillfart som funktion av trafikflödet i tillfarten, så erhålls speciellt kapaciteten för tillfarten som det gränsvärde för detta flöde då medelfördröjningen blir "oändligt stort".¹⁾ Även andelar stoppade fordon och medelkölängden kan beräknas ur medelfördröjningen.

Samtliga mått förutsätts beräknade vid vissa givna trafikförhållanden, varvid även trafikflödenas storlek måste specificeras. Vilka förhållanden beräkningarna skall avse, de dimensionerande förhållanden, är självfallet av stor betydelse men behandlas inte här.

2.2 Översikt över inverkan av faktorer

Vid beräkning av t ex medelfördröjning för en tillfart bör beaktas inverkan av ett stort antal variabler (ingångsdata):

Trafikförhållanden - flöden i samtliga tillfarter

- andelar svängande fordon
- andelar av olika fordonslag
- förekomst av gång- och cykeltrafik

Geometrisk utformning - antal tillfarter

- antal körfält och körfältsbredder i till- och frångarter
- körfältsmarkeringar
- refuger, mittremsa, kantstensradier etc
- tillfarternas anslutningsvinklar
- längd på kömagasin

¹⁾ Detta gäller i varje fall korsningar med stopp- eller väjningsplikt, där ett stationärt flöde nära kapaciteten kräver ständig kö i tillfarten. För korsningar med högerregel är det tänkbart att kapaciteten uppnås vid ett tillstånd utan ständig kö

- lutningar
- siktförhållanden

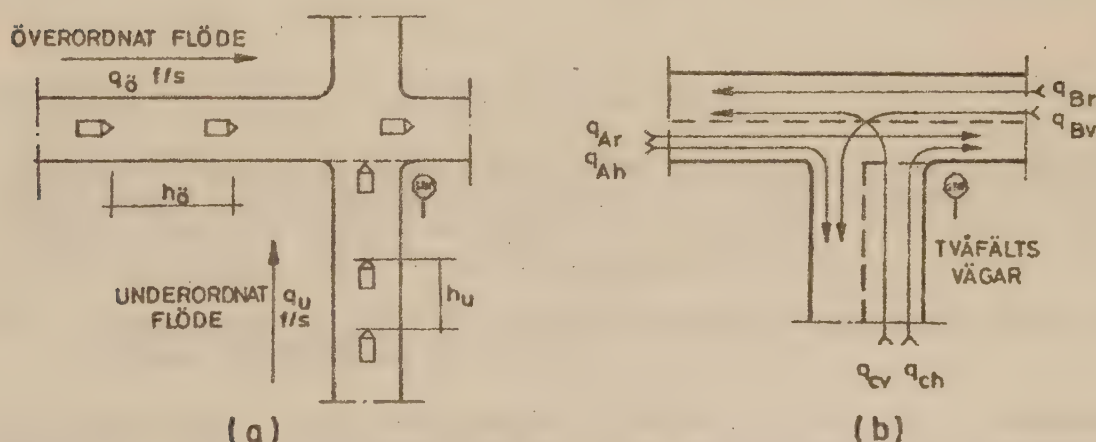
Reglering

- stopplikt, väjningsplikt eller högerregel
- hastighetsbegränsning
- eventuell enkelriktning

Därtill kommer ett antal övriga förhållanden, vilka av olika skäl svårigen kan beaktas i en praktisk beräkningsmetod: väglag och ljusförhållanden, typ av omgivning (landsbygd, olika tätortsförhållanden), etc, etc. De olika faktorernas inverkan är sannolikt inte oberoende.

Att basera en beräkningsmetod på direkt uppmätta samband mellan å ena sidan t ex medelfördröjningen, å andra sidan samtliga nämnda faktorer torde kräva ett dataunderlag av hart när orimlig omfattning. En väsentlig reduktion av databehovet är emellertid möjlig om medelfördröjningen (liksom kapacitet, kölängd etc) beskrivs i en teoretisk modell som funktion av ett fåtal parametrar. Dessa parametrar bör då väljas så, att de med hjälp av mätbara och generella samband kan beskriva inverkan av olika indata (avseende trafikförhållanden, geometri etc).

De teoretiska beräkningsmetoder som hittills utvecklats är alla baserade på interaktionen mellan två enkelriktade, enkla (= i vardera ett körfält) korsande fordonströmmar av vilka den ena (q_0) generellt har företräde framför den andra (q_u). Se FIGUR 2 a. Denna teori är väsentligen oberoende av regleringsformen (stopplikt, väjningsplikt eller högerregel). Funktionen hos en mer realistisk korsning, som i FIGUR 2 b, kan därefter beskrivas som en överlagring av ett antal sådana enkla interaktioner.



FIGUR 2 a. Enkel interaktion (två korsande strömmar)
b. Flera överlagrade interaktioner

I t ex trevägskorsningen i FIGUR 2 b är q_{Ch} underordnad i förhållande till q_{Ar} ; q_{Cv} underordnad i förhållande till q_{Ar} , q_{Bv} och q_{Br} samt q_{Bv} underordnad i förhållande till q_{Ar} och q_{Ah} (men överordnad i förhållande till q_{Cv}).

Betrakta återigen den enkla interaktionen, FIGUR 2 a. Stationära förhållanden förutsätts, dvs flöden, fördröjning etc behandlas som medelvärden mätta över en längre tid (t ex 15 min).

Kapaciteten för den underordnade tillfarten (K) antages uppnådd vid ständig kö i denna tillfart. Antag att minst ett fordon (det första i kön) från den underordnade strömmen kan passera varje gång tidsavståndet mellan successiva fordon i den överordnade strömmen (h_o) är större än något värde a, det "kritiska" tidsavståndet. Antag att minst två fordon kan passera om h_o är större än ($a + b$), där b (eventuellt = a) är något annat kritiskt värde etc. Kapaciteten beror uppenbarligen på följande två statistiska frekvensfunktioner:

- (1) frekvenserna $f_o(h_o)$ av olika tidsavstånd i den överordnade fordonsströmmen (medelvärdet $\bar{h}_o = 1/q_o$).
- (2) sannolikheterna $P_n(\bar{h}_o)$, där $n = 1, 2, \dots$, att minst n fordon utnyttjar ett visst tidsavstånd h_o i den överordnade strömmen.

Den totala fördröjningen d för fordon från den underordnade strömmen definierades i kapitel 2.1 som den extra restiden (per fordon) genom korsningen, utöver den restid som erhållits om flödet kunnat passera med samma hastighet som (tillräckligt långt) uppströms korsningen. Denna fördröjning definierades också som bestående av två delar, fördröjningen under körning (d_f) samt väntetiden (d_v). Början av betjäningstiden (d_b) definieras här som det ögonblick sista framförvarande fordon sätts i rörelse för att passera stopplinjen (motsvarande). För ett fordon som inte behöver vänta i kö definieras $d_v = d_b$ (dvs kötiden $d_k = 0$). Jämför FIGUR 1.

Betjäningstiden (d_b) blir i allmänhet olika beroende på om det betraktade fordonet väntat i kö (d_b^k) eller ej (d_b^o). Om ständig kö råder måste gälla att

$$K = 1/d_b^k \quad \dots (1)$$

där d_b^k är medelvärdet av betjäningstiden vid kö.

Betjäningstiden blir, liksom kapaciteten, en funktion av dels tidsavståndsfördelningen i den överordnade strömmen, dels sannolikheterna att olika sådana tidsavstånd accepteras (mom (1) och (2) ovan). Väntetiden i kö, och därmed väntetiden, måste emellertid dessutom bero av

- (3) sannolikheten $f_u(h_u)$ för olika tidsavstånd i den underordnade fordonsströmmen (medelvärdet $\bar{h}_u = 1/q_u$).

(Anländer fordon i den underordnade tillfarten ett och ett i regelbundna intervall, större än medelbetjäningstiden, blir sannolikheten att en kö bildas mindre än om fordon t ex anländer kolonnvis, även vid samma flöde).

Sammanfattningsvis är således problemet med den enkla interaktionen fullständigt beskrivet av tidsavståndsfördelningarna i de två strömmarna och av de kritiska tidsavstånden (vilka skall definieras mer exakt senare). Problemet med flera över- eller underordnade strömmar, t ex i FIGUR 2 kan (teoretiskt, i praktiken endast approximativt) beskrivas fullständigt med hjälp av flera sådana samverkande delmodeller.

I den beskrivna modellen ingår speciellt trafikflödena som de inverterade medelvärdena av resp tidsavståndsfördelning t ex $q_u = 1/\bar{h}_u$. Korsningens geometriska utformning påverkar dels (vad avser antal körfält och kanalisering) klassificeringen i över- och underordnade fordonsströmmar, dels (vad dessutom avser siktförhållanden, radier, körfältsbredder, lutningar etc) de kritiska tidsavstånden. De senare beror även av faktorer som regleringsform, hastigheter, andelar av olika fordonsslag, väglag och ljusförhållanden.

Fördröjningen under körning, dvs retardations- och accelerationsförlusterna, beror främst av hastigheten på den underordnade vägen, av olika geometriska förhållanden (radier, siktförhållanden etc) och av regleringsformen. För en tillfart med väjningsplikt eller högerregel inverkar också sannolikheten att ett fordon alls behöver stanna, vilken i sin tur beror av samma faktorer som väntetiden.

Fordon från en överordnad tillfart i en korsning med stopp- eller väjningsplikt antages normalt kunna passera korsningen obehindrat, utom vid belastningsgrader nära 1,0 då underordnade fordon tenderar "tilltvinga" sig tidsavstånd. Vänstersvängande fordon från en överordnad tillfart, vilka är underordnade mötande fordon, behandlas dock i princip som fordon från en underordnad tillfart.

2.3 Befintliga beräkningsmetoder

Enkla teoretiska modeller för beräkning av kapaciteten för en underordnad tillfart, i korsningar med stopp- eller väjningsplikt, användes först i Tyskland under 1950-talet: Grabe 1954, Leutzbach 1957, Wörner 1963 och Krell 1958. För kapaciteten per körfält (K , f/s) härleder Grabe uttrycket:

$$K = q_{\bar{o}} e^{-aq_{\bar{o}}} / (1 - e^{-aq_{\bar{o}}}) \quad ..(2)$$

där $q_{\bar{o}}$ (f/s) är det överordnade flödet och $a(s)$ ett "kritiskt" tidsavstånd.

I formel (2) antages dels att tidsavståndsfördelningen $f_{\bar{o}}(h_{\bar{o}})$ är en negativ exponentialfördelning vilket approximativt gäller vid låga flöden, dels att det kritiska tidsavståndet a är konstant. Ett väntande fordon antages kunna passera om tidsavståndet $h_{\bar{o}}$ är större än a men mindre än $2a$, två om $h_{\bar{o}}$ är större än $2a$ men mindre än $3a$, etc.

Olika varianter av formel (2) erhålls vid alternativa antaganden beträffande tidsavståndsfördelningen och det kritiska tidsavståndet (se kapitel 4.3). Harders 1968 beaktar dessutom effekten av köbildning i de överordnade tillfarterna (t ex i körfält för vänstersvängande fordon).

Nämnda arbeten har resulterat i ett antal beräkningsanvisningar avsedda för praktiskt bruk, se t ex Jessen 1968 och Siegloch 1973. Även i t ex England ges anvisningar för beräkning av kapaciteten, se Roads in Urban Areas 1965, men dock av ett betydligt grövre slag. I HCM 1965 redovisas inga beräkningsmetoder utan rekommenderas att korsningen dimensioneras som för signalreglering.

Beräkningsmetoder avseende fördröjningen har utarbetats av bl a Tanner 1962 men såvitt bekant fått liten praktisk användning. Tanners modell ger väntetiden för den enkla interaktionen (enligt FIGUR 2 a) vid vissa antaganden avseende tidsavståndsfördelningar och kritiska tidsavstånd (se kapitel 4.3.2).

Företagna valideringsmätningar, se t ex Owens 1969 visar på en relativt god överensstämmelse mellan uppmätt kapacitet och teoretiskt beräknad, enligt de mest fullständiga befintliga modellerna (t ex enligt Tanner). Behovet av fortsatt forskning, se OECD 1973, är inte enbart motiverat av kravet på absolut noggrannhet, i t ex det beräknade kapacitetvärdet, utan i lika hög grad av kravet på konsistens i modellerna vad gäller kapacitetens (eller medelfördröjningens) beroende av de förhållanden som kan påverkas vid dimensioneringen: antalet körfält, kanalisering, längden av kömagasin etc.

3 ACCEPTERADE TIDSAVSTAND

3.1 Inledning

Enligt den i kapitel 2.2 översiktligt beskrivna teoretiska modellen är det "kritiska" tidsavståndet, dvs det tidsavstånd som "i medeltal" krävs i ett överordnat flöde för att ett väntande underordnat fordon skall passera, den jämte trafikflödenas storlek viktigaste parametern vid beräkning av kapacitet och fördröjning. Inverkan av t ex olika geometriska förhållanden i korsningen uttrycks till stor del via inverkan på det kritiska tidsavståndet.

Det kritiska tidsavståndet kan definieras och mätas på ett flertal olika sätt. Dessutom kan definieras olika kritiska tidsavstånd, eller närbesläktade parametrar, för olika situationer (t ex beroende på om det underordnade fordonet just har anlänt respektive redan har avvisat ett tidsavstånd). Sådana definitioner behandlas i avsnitt 3.2 nedan.

I avsnitt 3.3 görs en översikt över den redan tämligen rikhaltiga litteratur som redovisar mätningar av kritiska tidsavstånd och deras beroende av olika förhållanden.

I avsnitt 3.4 (samt i APPENDIX 1-3) redovisas de fältmätningar avseende kritiskt tidsavstånd som företogs i Sverige 1974, i regi av Statens Vägverk och med syfte att testa de utländska mätresultatens tillämpbarhet för svenska förhållanden. I avsnitt 3.5, slutligen, sammanfattas de viktigaste slutsatserna av litteraturinventering och fältmätningar.

3.2 Definitioner

Innebörden i begreppet kritiskt tidsavstånd förutsattes ovan intuitivt givet men måste nu definieras klarare. Olika sådana begrepp kommer att särskiljas, med utgångspunkt först från olika beslutssituationer, därefter från skillnader i en individs reaktion på samma situation vid olika tillfällen och sist från olika individers reaktion på samma situation.

Förutsätt således först att en individ i en viss beslutssituation, vilken strax skall beskrivas, alltid reagerar likadant och också att alla individer reagerar på samma sätt. Låt denna beslutssituation vara köra eller inte köra för det första fordonet i den underordnade strömmen i t ex FIGUR 2 a. Definiera det "första kritiska tidsavståndet" (a_1 , eng "critical lag") samt det "kritiska tidsavståndet" (a_g , "critical gap") som:

a_1 = (för ett fordon som just anländer till stopplinjen, eller en motsvarande linje): ett tidsavstånd räknat från det ögonblick fordonet ansluter till stopplinjen till det ögonblick första överordnade fordon passerar förbi, så stort att det precis accepteras.¹⁾

a_g = (för ett fordon som redan väntar vid stopplinjen): ett tidsavstånd räknat mellan successiva passager av två överordnade fordon, så stort att det precis accepteras.¹⁾

Varje fordon i den underordnade strömmen tar endast ställning till (accepterar eller förkastar) ett tidsavstånd av den förstnämnda typen men eventuellt flera (eller ett, eller inget) av den sistnämnda typen. Det första kritiska tidsavståndet (a_1) definieras ibland som endast avseende fordon vilka ej väntat i kö och betecknas då i det följande med a_1^0 . I andra modeller igen särskiljs ej mellan a_1 och a_g . Beteckningen a ($= a_1 = a_1^0 = a_g$) används nedan i sådana fall.

Analogt med a_g kan definieras en serie av kritiska tidsavstånd $a_g^{(2)}$, $a_g^{(3)}$.. etc, där:

$a_g^{(n)}$ = (förutsatt att minst n fordon väntar i den underordnade tillfarten): ett tidsavstånd räknat mellan successiva passager av två överordnade fordon, så stort att n fordon precis accepterar att köra ut i detta tidsavstånd.

Vanligen används emellertid en enklare modell, baserad på följande hypotes:

$$a_g^{(n)} = a_g + (n-1) \cdot a_f \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad \dots (3)$$

Parametern a_f , nedan kallad följdtiden, mäts oftast som tidsavståndet (i medeltal) mellan successiva passager över stopplinjen av sådana fordon i den underordnade strömmen vilka accepterar samma tidsavstånd som framförvarande fordon.

De ovan beskrivna beteendemodellerna, med konstanta parametervärden a , a_f etc, ger för många tillämpningar tillräckligt goda resultat. För andra tillämpningar, samt vid mätning av parametervärdena, måste den statistiska spridningen beaktas. Även med avseende på hur denna spridning skall definieras finns olika modeller, av vilka två skall omnämnas här. Beslutsituationen förutsätts hela tiden vara densamma, t ex om ett tidsavstånd mellan två successiva överordnade fordon skall accepteras eller ej.

Enligt den första modellen värderar en väntande bilist successiva, uppkomna tidsavstånd oberoende av varandra. Definiera:

$G^-(\alpha')$ = sannolikheten att ett tidsavstånd av storlek α accepteras.

Beroende på standardavvikelsen i funktionen $G^-(\alpha')$ kan således en bilist, enligt denna modell, mycket väl acceptera ett tidsavstånd som är mindre än ett som han tidigare förkastat. Den statistiska fördelningsfunktionen $G^-(\alpha')$ kommer i fortsättningen att benämnas fördelningen för det accepterade tidsavståndet.

¹⁾ I definitionen bortses från vissa tidskonstanter, vilka avser färdtider mellan t ex stopplinje och konfliktpunkt.

Mer användbar, men svårare att mäta praktiskt, är den statistiska fördelning som definieras på följande sätt: antag att en viss bilist alltid accepterar ett tidsavstånd om och endast om detta är större än något värde α , det "just accepterade" tidsavståndet. Betraktas olika bilister har detta α en viss statistisk fördelningsfunktion.

$G(\alpha)$ = sannolikheten att en bilist accepterar alla tidsavstånd om och endast om de är större än α .

Skillnaden mellan $G^-(\alpha)$ och $G(\alpha)$ beaktas ej i fortsättningen. Den kan dock orsaka annars oförklarliga avvikelser mellan olika teoretiska formler, till synes baserade på samma förutsättningar.

Hypotesen enligt formel (3), med konstanta värden på a_g och a_f , är den vanligaste i existerande beräkningsmetoder (t ex Harders 1968 och Tanner 1962) och har valts här främst för att medge jämförelser med tidigare mätningar. En alternativ ansats erbjuder t ex Siegloch 1973, som ansätter $P_n(h_0)$ som en kontinuerlig funktion av tidsavståndet h_0 , således ej en stegfunktion enligt ekv (3).

Särskiljs mellan accepterade tidssavstånd i olika situationer (ankommande eller väntande fordon etc) kan olika fördelningar definieras analogt med de olika kritiska tidsavstånden. De kritiska tidsavstånden kan nu ses som sådana konstanter vilka så väl som möjligt approximerar de accepterade tidsavståndens fördelningar (t ex medianer eller medelvärden).

För beräkning av kritiska tidsavståndet (för en viss situation) ur mätvärden finns ett flertal olika metoder vilka kan ge något olika resultat. En kort översikt av dessa metoder är därför motiverad. För en mer utförlig diskussion se t ex Miller 1972.

Vanligen föreligger mätdata i form av antal accepterade resp avvisade tidsavstånd av viss storlek, medan vad som söks är andelen personer som accepterar ett visst tidsavstånd. Eftersom personer med stora "just accepterade" tidsavstånd i medeltal avvisar fler tidsavstånd blir de överrepresenterade i materialet.

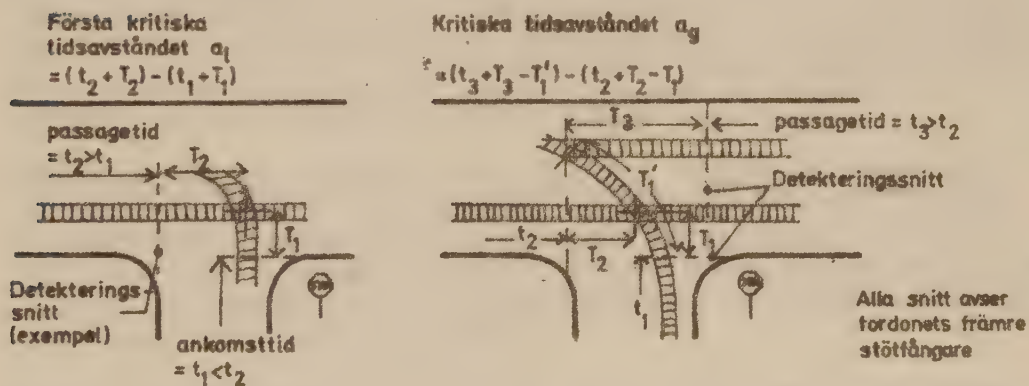
För att komma ifrån denna skevhet beaktar flera metoder, t ex Raff 1950, endast det första tidsavståndet för varje fordon. Raff's metod, som ger ett värde ungefär lika med medianen av $G^-(\alpha)$, blir därigenom mättekniskt oekonomisk. Det första kritiska tidsavståndet (a_1) skiljer sig dessutom i många fall från det kritiska tidsavståndet (a_g).

Raff's metod innehåller också ett subjektiv moment som ökar osäkerheten. De statistiska metoderna är bättre också därigenom att osäkerheten i det beräknade värdet kan uppskattas. Vanligast av dessa är den sk probit-analysen, i vilken oftast antages att funktionen $G(\alpha)$ följer en logaritmisk normalfördelning. Oftast anges det kritiska tidsavståndet som medelvärdet av denna fördelning, varvid erhålls ett i medeltal ca 0,2 - 0,3 s större värde än med Raff's metod - se Solberg och Oppenlander 1966 samt Miller 1972.

Även probit-analysen ger ett systematiskt fel om andra tidsavstånd än det första för varje fordon medtages. Ashworth 1968 har visat att detta fel kan uppskattas enkelt ur variansen i fördelningen $G(\alpha)$.

Ytterligare en faktor som försvårar jämförelser mellan olika mätvärden av det kritiska tidsavståndet är att olika referenspunkter för tidsavstånden tillämpas i olika undersökningar. Så använder t ex Raff korsningens begränsningslinjer för definition av första tidsavståndet, medan andra mäter i förhållande till en tänkt konfliktpunkt. Följdtiden, mellan successiva fordon i den underordnade tillfarten, mäts ibland på bakhjulen och ibland på framhjulen, etc.

I det följande skall med det kritiska tidsavståndet avses medelvärdet av fördelningsfunktionen $G(\alpha)$, bestämd med probit-analys och (vad avser α) korrigerad m h t överrepresentationen av avvisade tidsavstånd enligt Ashworth. De kritiska tidsavstånden skall vidare mätas i förhållande till konfliktpunkten (eg konfliktytans centrum), definierad m h t normala körspår för de inblandade fordonen. Jämför FIGUR 3 nedan.



t_1, t_2, t_3 = tidpunkt för ankomst till detekteringssnitt

T_2, T_3 = färdtid mellan detekteringssnitt och konfliktpunkt, för överordnat fordon

T_1, T_1' = dito, för underordnat fordon och beräknat som om tidsavståndet accepterats (även om det avvisats)

FIGUR 3 Använd definition på kritiskt tidsavstånd med hänsyn till konfliktpunkternas lägen.

3.3 Litteraturöversikt

Ett större antal mätvärden avseende kritiska tidsavstånd har publicerats under 1960-talet. Bland större mätningar, vardera omfattande ett flertal korsningar, kan nämnas Bissell 1960, NCHRP 1964, Solberg och Oppenlander 1966, Wagner 1966, i de skandinaviska länderna Rörbech 1966.

En jämförelse av samtliga studerade resultat ger som riktvärde för det kritiska tidsavståndet - vid reglering med stoppplikt, för ett fordon som skall köra rakt fram över en dubbelriktad tvåfältig väg, hastighetsbegränsad till 50 km/h, och i övrigt vid normala tätortsförhållanden - ca 5,5 - 6 s. Variationerna i detta värde p g a trafikförhållanden m m kan dock vara stora.

Variationerna i "det just accepterade" tidsavståndet mellan olika förare kan också vara betydande. Standardavvikelsen är av storleksordning 3 s. Fördelningen är skev, så att 5-percentilen ligger närmare medianen än 95-percentilen.

Det första kritiska tidsavståndet (a_1) är vid stoppreglering sannolikt 0-1 s större än det kritiska tidsavståndet (a_g), enligt mätningar av Wagner 1966. Skillnaden uppges vara störst vid hög belastningsgrad och kan då förklaras av att föraren behöver viss tid för att orientera sig. Vid väjningsplikt är a_1 däremot lägre än a_g (minst skillnad vid stark trafik), enligt NCHRP 1964, emedan inte alla fordon behöver stanna.

Mätningar av följdtiden är färre, något förvånande emedan denna parameter betyder lika mycket för kapaciteten som det kritiska tidsavståndet. Många beräkningsmetoder förutsätter att dubbla kritiska tidsavståndet erfordras för två fordon, andra att följdtiderna är desamma som vid signalreglering. Båda dessa ansatser ger sannolikt felaktiga resultat.

Rapporterade värden på följdtiden (dess medelvärde) vid stoppplikt varierar mellan 2,7 och 4,2 sekunder. Flera undersökningar, t ex Owens 1969, och Viinikka 1970, påpekar att följdtiden står i en tämligen konstant relation till det kritiska tidsavståndet (den förre är ca 60% av det senare).

Standardavvikelsen i följdtiden beräknad mellan olika trafikanter är relativt stor, enligt Wagner ca 1,5 s. Därvid har emellertid inte beaktats den sannolikt systematiska skillnaden i följdtid mellan 1:a och 2:a fordon, mellan 2:a och 3:e etc. Bendtsen 1972 uppmätte således i en korsning följdtiderna 4,2 - 3,9 - 3,8 - 3,7 s. som medelvärden för första, andra, tredje, samt fjärde och följande tidsavståndet respektive (för fordon som utnyttjar samma tidsavstånd i den överordnade strömmen).

Variationer i de kritiska tidsavstånden med regleringsform, geometriska förhållanden, trafikförhållanden m m behandlas nedan med avseende på varje faktor separat. Beroendet mellan de olika faktorernas inverkan kan knappast bedömas mot bakgrund av befintliga resultat, men torde inte vara försumbart.

Inverkan av trafikförhållanden

Högre belastningsgrad för en tillfart med stopplikht medför att det kritiska tidsavståndet minskar. Skillnaden i samma korsning, mellan "låg-" och "högtrafik", på upp till 2 s har rapporterats (Wagner). För korsningar med väjningsplikt uppger NCHRP ingen skillnad beträffande första kritiska tidsavståndet, medan däremot det första kritiska tidsavståndet befanns vara 0,7 s lägre vid låg- än vid högtrafik.

Flera undersökningar uppger ett 0,5 - 1,0 s lägre kritiskt tidsavstånd för högersvängande fordon än för rakt fram körande. För vänstersvängande fordon nämns ett 0 - 0,5 s högre värde än för rakt fram körande. Linseman 1966 påpekar att beskrivna skillnader i hög grad beror av korsningens utformning, som körspårsradie och förekomst av kanalisering.

Enda kända undersökning som särskiljer olika typer av motorfordon, Wagner 1966, uppger inga signifikanta skillnader vad avser det kritiska tidsavståndet. Om detta är riktigt torde tyngre lastbilar och bussar ofta orsaka retardationer i de korsande trafikströmmarna. Sannolikt torde dock tyngre fordon i varje fall kräva längre följd-tider, i likhet med vad som är fallet i signalreglerade korsningar.

Inverkan av geometriska förhållanden.

Undersökningar av Solberg och Oppenlander 1966, Wagner 1966, NCHRP 1964 och Bissett 1960 antyder sammanlagt att det kritiska tidsavståndet är kanske ca 1 s större om den överordnade leden (vid stopp- eller väjningsplikt) är fyrfältig än om den är tvåfältig. Förekomst av mittremsa kan möjligen minska det kritiska tidsavståndet, om den utformas så att ett korsande fordon kan passera i två etapper. Uppgifter om inverkan av den underordnade tillfartens bredd saknas.

Inverkan av utformningsdetaljer avseende refuger, målning, kantstensradier etc är sannolikt väsentlig men svår att mäta. En vanlig hypotes, som det inte finns anledning bestrida, är att en klarare och mer överskådlig utformning medger kortare orienteringstid och därmed sannolikt mindre kritiska tidsavstånd.

Att särskilt accelerationskörfält och stor kantstensradie minskar det kritiska tidsavståndet för högersvängande fordon är otvetydigt. Mätningar från rampanslutningar till t ex motorvägar visar på kritiska tidsavstånd kring 2 - 4 s, beroende på relativ hastighet och konfliktvinkel för de inblandade fordonen.

Effekten av siktförhållandena, från en position i en underordnad tillfart, är omstridd. Raff 1950 uppger att det kritiska tidsavståndet är mindre vid kortare siktsträckor, men mätte som nämnts endast det första kritiska tidsavståndet (a_1). Det såvitt bekant enda kontrollerade försöket, Linseman 1966, visade på en ökning med 1 - 2 s då sikten inskränktes med parkerade fordon.

Inverkan av reglering

Antalet undersökningar avseende väjningsplikt är väsentligt färre än de som avser stopplikt. Enda kända före/efterstudien med de två regleringsformerna, NCHRP 1964 visar på ett ca 1 s lägre kritiskt tidsavstånd vid väjningsplikt. Skillnaden är större vid låg- än vid högtrafik. Mätvärden avseende korsningar med högerregel har inte påträffats.

Undersökningar av bl a Rörbeck 1966 tyder på att det kritiska tidsavståndet för rakt fram körande fordon från en underordnad tillfart ökar vid ökande hastighet på den överordnade leden, med i storleksordning 1 s vid ökning från 50 till 90 km/h. Skillnaden är sannolikt större för påsvängande fordon, som tvingas accelerera till en högre hastighet.

Inverkan av andra faktorer

Mätningar omfattande korsningar i olika tätorter, t ex NCHRP 1964, tyder på att det kritiska tidsavståndet är mindre i större tätorter än i mindre. Effekten, som åtminstone delvis kan bero på annat körsätt, är dock vanskelig att separera från inverkan av t ex olika belastningsgrader.

En studie av Tsongos 1969 gav till resultat att det kritiska tidsavståndet var endast ca 0,2 s högre i mörker än i dagsljus, vid i övrigt jämförbara förhållanden. Uppgifter avseende inverkan av nederbörd och väglag har inte påträffats.

3.4 Fältmätningar

3.4.1 Bakgrund och syfte

Vid beräkning av kapacitet och medelfördröjning för en underordnad tillfart enligt någon teoretisk modell är värdet på det kritiska tidsavståndet, och på följdtiden (vid en definition enligt formel 3), av mycket stor betydelse. T ex ger en ökning av det kritiska tidsavståndet från 5,0 till 5,5 s en ca 15 - 30% lägre kapacitet, beroende på det överordnade flödets storlek m m. Den möjliga noggrannheten i en beräkningsmetod för

praktiskt bruk är därför i hög grad avhängig möjligheten att med hjälp av generella samband förutsäga det kritiska tidsavståndet och följdtiden.

Litteraturinventeringen enligt kap 3.3 gav viss ledning för en sådan bestämning, såväl vad avser totalnivån för det kritiska tidsavståndet som vad avser dess beroende av de viktigaste inverkanse faktorerna. En kontroll av de refererade uppgifterna för speciellt svenska förhållanden bedömdes emellertid som angelägen.

Med krav på statistiskt signifikanta resultat och med ambition att i urvalet täcka alla förekommande korsningstyper skulle för mätningarna krävas en omfattning av orimlig storlek. Urvalet av mätplatser, innefattande 18 korsningar, har därför karaktären av stickprov. Syftet med mätningarna kan sägas vara primärt att kontrollera totalnivån på det kritiska tidsavståndet och följdtiden, mot bakgrund av befintliga utländska mätningar, och sekundärt att genom t ex parvisa jämförelser kontrollera uppgifter avseende inverkan på dessa parametrar av några viktigare inverkanse faktorer. Endast korsningar med stopp- eller väjningsplikt beaktas.

3.4.2 Urval av mätplatser

Mot bakgrund av det i avsnitt 3.4.1 beskrivna syftet med mätningarna ställdes på urvalet dels kravet att mätplatserna tillsammans skulle utgöra ett representativt stickprov på i Sverige vanliga korsningstyper, dels att parvisa jämförelser borde vara möjliga avseende främst följande inverkanse faktorer:

- | | | |
|----|---|---|
| a) | Belastningsgrad | - låg resp hög (jämföres för varje korsning, avseende olika tidpunkter) |
| b) | Antal tillfarter | - tre eller fyra |
| c) | Antal körfält, ϕ_0 led | - två eller fyra |
| d) | Antal körfält, u_0 tillfart | - ett eller flera |
| e) | Förekomst av separata körfält för vänstersvängande fordon från överordnad led | - ja eller nej |
| f) | Förekomst av accelerationsfält för högersvängande fordon från underordnad led | - ja eller nej |
| g) | Förekomst av mittremsa på överordnad led | - ja eller nej |
| h) | Regleringsform | - stopp- eller väjningsplikt |

- i) Hastighetsgräns - 50, 70 eller 90 km/h (ö, led)
- j) Tätortsstorlek - större tätort, mindre tätort, landsbygd

Dessutom ställdes vissa generella krav på de valda korsningarna, i avsikt att undvika förhållanden som skulle försvåra jämförbarheten med avseende på de studerade variablerna. Dessa krav berörde förekomst av gång- och cykeltrafik, parkering och busshållplatser, avstånd till angränsande korsningar och utfarter, förekomst av lutningar, siktförhållanden etc. Exempelvis uteslöts genomgående korsningar i centrala tätortsdelar. Av ekonomiska skäl, mht erforderlig mättid, kunde inte medtagas korsningar med ett lägre flöde i den studerade underordnade tillfarten än ca 2000 f/VMD.

Urvalet av mätplatser baserades på en enkät till ett större antal kommuner och vägförvaltningar, samt på en inspektion av föreslagna objekt. De 18 slutligen valda mätplatserna beskrivs i APPENDIX 1 (sid 1 - 4).

I samtliga korsningar mättes accepterade tidsavstånd och följd-tider för fordon från en underordnad tillfart, för alla körriktningar (= tre vid fyrvägs-korsning) och oavsett körfält. I fyra korsningar (nr 3, 7, 10 och 15 i APPENDIX 1) studerades särskilt också kritiska tidsavstånd för vänstersvängande fordon från en överordnad tillfart. Dessutom mättes betjäningstider och olika andra komponenter i fördröjningen för fordon från en underordnad tillfart, i flertalet korsningar.

3.4.3 Mätförfarande

Vid mätningarna utnyttjades en automatisk registrering av fordonspassager och fordonsnärvaro i olika punkter i korsningen och dess tillfarter.

För detekteringen av fordon användes företrädesvis närvarodetektorer i den underordnade tillfarten, som regel två per körfält (eller per ca 2,5 m bredd), samt pneumatiska detektorer i överordnade tillfarter, som regel en per körfält. Dessutom indikerades manuellt med hjälp av strömbrytare ett flertal funktioner som körriktningar för passerande fordon, tidpunkter då underordnade fordon lämnar korsningen (för mätning av fördröjning), tidpunkter då fordon stannar i resp åter startar från positioner inom korsningens begränsningslinjer, störningar av olika slag (t ex gång- eller cykeltrafikanter) etc.

All automatisk och manuell information stansades direkt och automatiskt på hållremsa, som händelsekod (t ex numret på en viss detektor) jämte tidpunkt. Definitionen av kritiska tidsavstånd, t ex med avseende på vilka tidskonstanter som skall tillämpas och vilka fordonsströmmar som skall inräknas i det överordnade flödet, kunde således varieras vid bearbetningen, vilket bedömdes som värdefullt.¹⁾

1)

Alternativ innebärande en direkt registrering av accepterade och avvisade tidsavstånd hade inte medgivit en sådan test av olika definitioner.

Den effektiva, bearbetade mättiden per korsning är normalt 6 - 8 timmar, varav ca hälften under högtrafiktid. Mättiden organiserades i sammanhängande mätpass å 20 - 30 minuter, vilka kunde bearbetas såväl separat som tillsammans. För att minimera effekten av fel i mätlogiken registrerades dessutom antalet fordon i den underordnade tillfarten manuellt (via databyggen) ca en gång/minut.

En närmare beskrivning av mätförfarandet, med ett exempel på försöksuppställning, återfinns i APPENDIX 2.

3.4.4 Bearbetningsmetod

Den från mätningarna erhållna informationen har formen av en serie händelser (t ex detektorpassager) i tidsföljd, där för varje händelse anges typ och tidpunkt. För bearbetning av denna information utvecklades ett generellt datorprogram (ANAGAP), vilket beskrivs i APPENDIX 3.

Från bearbetningsprogrammet erhålls primärt följande information (avseende alla mätningar i en korsning eller endast vissa mätpass):

A. Kritiska tidsavstånd

Beräknat antal accepterade och avvisade tidsavstånd av olika typ tabelleras med 0,5 s storleksintervall, varefter tabellen bearbetas med probit-analys. Jämför definitionen i avsnitt 3.2. Indelningen i typer avser dels det underordnade fordonets körriktning (t ex högersvängande), dels "lag" (a_1) resp "gap" (a_2). För en korsning särskiljdes dessutom två olika typer av "lag", beroende på om det underordnade fordonet just anlänt eller väntat i kö vid tidsavståndets början.

De erforderliga tidskonstanterna för beräkning av tidsavståndens storlek, om dessa mäts i resp konfliktpunkter (enligt FIGUR 3), erhöles i en inledande bearbetningsomgång samt med hjälp av en uppmätning av korsningarna. Vid denna inledande bearbetning (ofta med 3-4 olika ansatser) testades också alternativa ansatser till definition av det överordnade flödet. Betrakta t ex den konvergerande konflikten mellan väjningspliktiga, högersvängande fordon och fordon från vänster (FIGUR 2b). Det är inte uppenbart om alla fordon från vänster eller endast en del av dessa (t ex de i kantstenskörfältet) skall räknas som överordnade, vid definitionerna av tidsavstånd.

Som kriterium på lämplig definition användes vid dessa test att standardavvikelsen i det accepterade tidsavståndet skall vara så liten som möjligt. Om denna standardavvikelse är liten, så kan det kritiska tidsavståndet anses väl beskriva trafikanternas bedömning.

Vid bearbetning med probit-analys testades två olika ansatser för det accepterade tidsavståndets statistiska fördelning (med hjälp av Chi - två - kriterium). Den logaritmiska normalfördelningen gav därvid som regel bättre anpassning än normalfördelningen.

B Följdtid

Följdtiden beräknas här som tidsavståndet mellan två underordnade fordon vilka båda utnyttjar samma tidsavstånd i det överordnade flödet. Endast sådana tidsavstånd beaktas, där avståndet mellan de två fordonen är mindre än ca 5 m då det första fordonet passerar stopplinjen. Även successiva följdtider registreras, om mer än två fordon accepterar samma tidsavstånd, med samma förutsättning. Följdtider registreras i 0,5 s storleksintervall och bearbetas m a p medelvärde och standardavvikelse. Olika körriktningar särskiljs ej.

Det är inte i princip givet att detta sätt att mäta följdtiden motsvarar definitionen enligt formel (3). Hypotesen att a_f i formel (3) kan mätas på beskrivet sätt, d v s att den uppmätta följdtiden motsvarar det extra tidsavstånd som "i medeltal" krävs för att två istället för ett väntande fordon skall passera, är emellertid vanlig och styrks också något av vissa resultat från denna undersökning (se avsnitt 3.4.5).

Det mest närliggande alternativet, att definiera och beräkna ett kritiskt tidsavstånd för två fordon etc analogt med det kritiska tidsavståndet för ett fordon, genomfördes här av ekonomiska skäl för endast en korsning (större datamängder krävs).

C Betjäningstid och fördröjning

Vissa komponenter av fördröjningen för fordon från en underordnad tillfart, definierade i avsnitt 2.1, mättes i avsikt att möjliggöra en grov rimlighetskontroll av vissa teoretiska beräkningsmodeller.

I princip beräknas dessa komponenter som färdtiderna mellan varje par (1 - 2, 2 - 3 etc) av följande snitt, för fordon från en underordnad tillfart:

- (1) ankomst i tillfarten, i ett snitt uppströms längsta (normalt) förekommande kö
- (2) ankomst till en position strax bakom stopplinjen (mot-svarande) eller tidpunkt då sista framförvarande fordon passerar stopplinjen.
- (3) utfart (passage av stopplinjen)
- (4) utfart från korsningen (passage av korsningens begränsningslinjer vid någon av fränfarterna)

Färdtiden (2) - (3) motsvarar betjäningstiden, eventuellt så när som på ett konstant additivt fel beroende på osäkerheten vid definition av position (2). Betjäningstiden bestäms i storleksklasser med bredden 0,5 s och separat för varje körriktning.

Samtliga färdtider (1-2, 2-3, 3-4) bestäms dels för alla fordon, dels separat för fordon som inte hejdas av kö och som accepterar det först erbjudna tidsavståndet. Fördröjningen utgörs i det senare fallet endast av fördröjning under körning (väntetiden = 0). Tex kan därigenom medelväntetiden approximativt beräknas som skillnaden i medelfärdtid mellan snitten 1 och 3 för dels alla fordon, dels endast de för vilka väntetiden är = 0. Hela fördröjningen under körning kan dock inte mätas.

För alla komponenter av fördröjningen (utom betjäningstiden) erhålls endast medelvärden.

D Övriga uppgifter

Från bearbetningsprogrammet erhålls slutligen också flöden i samtliga fordonsströmmar, mättid, viss administrativ information samt utskrifter av upptäckta fel av olika slag (tex ologisk tidsföljd mellan händelser).

3.4.5 Resultat

I TABELL 2 nedan sammanfattas erhållna resultat avseende kritiska tidsavstånd, uppdelade på "lag" (a_l) och "gap" (a_g) resp på olika körriktningar, samt följdtider. Tabellen avser endast fordon från en underordnad tillfart. Numreringen av mätplatserna hänvisar till beskrivningen i APPENDIX 1.

MÄTPLATS ²	K R I T I S K T T I D S A V S T A N D (s)						FÖLJDTID (s)
	TOTALT	"LAG"	"GAP"	H sv	R fr	V sv	
		Oavsett körriktning			Oavsett "lag" eller "gap"		
1	5,5	4,8	6,0	5,0	-	6,3	3,0
2	5,9	6,0	5,8	5,1	6,0	6,1	3,5
3	5,8	6,0	5,6	5,5	-	6,0	-1)
4	5,8	5,9	5,6	5,6	-1)	5,9	3,6
5	5,5	5,4	5,5	5,9	5,1	-1)	-1)
6	5,2	4,6	5,5	4,7	-	5,6	3,0
7	3,5	3,4	-1)	3,5	-	-	-1)
8	6,7	6,8	6,6	6,0	7,0	7,4	-1)
9	5,6	5,3	5,8	4,6	6,0	6,0	3,1
10	4,5	4,2	5,1	4,0	-	4,9	2,6
11	4,7	4,6	4,8	4,3	-1)	5,1	2,9
12	4,1	-1)	4,2	3,9	-	4,6	2,2
13	6,6	6,7	6,6	6,5	6,7	6,6	4,0

MÄTPLATS	K R I T I S K T T I D S A V S T Å N D (s)						FÖLJDTID (s)
	TOTALT	"LAG"	"GAP"	H sv	R fr	V sv	
		Öavsett körriktning		Öavsett "lag" eller "gap"			
14	6,8	6,8	6,3	6,2	6,9	7,5	-1)
15	5,0	4,8	5,3	3,7	5,3	5,2	3,5
16	4,6	4,4	5,0	3,3	4,7	5,3	2,9
17	7,0	6,5	7,2	6,7	-	7,3	4,2
18	6,5	6,5	6,6	6,7	-	6,4	4,1

1) få observationer

2) se APPENDIX 1

TABELL 2 Uppmätta kritiska tidsavstånd samt följdtider, för fordon från en underordnad tillfart.

Konfidensintervallen (95 %) för de kritiska tidsavstånden i tabellen, före uppdelning på olika typer, är av storleksordning $\pm(0,05 - 0,10)$ s och som högst för någon korsning $\pm 0,22$ s. Efter uppdelning på typ är konfidensintervallen (95 %) för samtliga medtagna värden mindre än $\pm 1,0$ s. Konfidensintervallen (95 %) för följdtiderna är normalt $\pm (0,15 - 0,30)$ s och som högst $\pm 0,52$ s.

Standardavvikelsen för det accepterade tidsavståndet, dvs för den statistiska fördelningen vars median är det kritiska tidsavståndet, ligger i intervallet 1,8-3,8 s. Standardavvikelsen är högre för "lag" än för "gap", som regel högre för svängande fordon än för fordon med körriktning rakt fram.

För en mätplats (nr 10) gjordes en något mer detaljerad analys av de accepterade tidsavstånden och av följdtiderna. Det kritiska tidsavståndet ("gap", a_g) bestämdes således även för två (vänstersvängande) fordon i en kolonn. Därvid tabellerades alla tidsavstånd i det överordnade flödet, vid vars början minst två fordon väntade i kolonn. De av dessa tidsavstånd betecknades som accepterade, vilka accepterades av båda fordonen (och eventuellt av flera).

Medelvärdet för detta accepterade tidsavstånd, således avseende två fordon erhöles till 7,7 s ($\pm 0,5$ s konfidensintervall), vilket väl motsvarar summan av ett kritiskt tidsavstånd för ett fordon (5,2 s, för samma fordonsström) och en följd tid (2,6 s).

För samma mätplats bearbetades också det första kritiska tidsavståndet ("lag" a_l) separat för just ankommande fordon resp för fordon som väntat i kö. För vänstersvängande fordon erhöles 4,0 resp 4,5 s, jämfört med 4,2 s vid sammanslagning av materialet. Skillnaden är precis signifikant på 95 % nivå.

Det kritiska tidsavståndet för vänstersvängande fordon från en överordnad tillfart, som mätts på i princip samma sätt som för fordon från en underordnad tillfart, bearbetades för fyra av mätplatserna. Resultaten framgår av TABELL 3. För följdtiden erhöles alltför få observationer.

MÄTPLATS ¹⁾	KRITISKT TIDSAVSTÅND			KONFIDENSINTERVALL
	TOTALT	"LAG"	"GAP"	95 % (LAG + GAP)
3	4,8	4,0	6,1	4,5 - 5,2
8	6,1	5,8	7,2	5,7 - 6,6
10	4,6	4,3	5,0	4,3 - 4,9
15	4,9	4,5	5,6	4,7 - 5,1

¹⁾se APPENDIX 1

TABELL 3 Uppmätta kritiska tidsavstånd avseende vänstersvägande fordon från en överordnad tillfart.

Mätvärdena avseende fördröjningen är inte generella, på grund av det stora antalet inverkanande variabler, och blir av intresse först vid jämförelse med t ex teoretiskt beräknade resultat.

3.5 Slutsatser

Nivån på de uppmätta kritiska tidsavstånden och följdttiderna, enligt TABELL 2, synes generellt överensstämma väl med inventerade utländska mätresultat.

Vid jämförelse med andra mätningar bör beaktas eventuella avvikelser i definitionen av det kritiska tidsavståndet, eller i den använda beräkningsmetoden. Att de definitioner som här använts är lämpliga för tillämpning i en beräkningsmodell är en hypotes som det torde kräva en betydligt större undersökning för att definitivt fastställa (eller avvisa).

En betydelsefull och kanske ibland förbisedd punkt vid definitionen av kritiskt tidsavstånd är vilka fordon som skall kunna definiera tidsavståndets början och slut, vid konvergerande konflikter. Generellt erhöles i den genomförda undersökningen en mindre oförklarad spridning i beteendet om vid konvergerande konflikter endast beaktades flödet i ett av frångångens körfält (om flera körfält fanns, och förutom flödet i korsande strömmar).

Urvalet av mätplatser i undersökningen medger vissa försiktiga slutsatser avseende olika faktorerers inverkan på det kritiska tidsavståndet för fordon från en underordnad tillfart.

(a) Trafikförhållanden

För rätvinkliga korsningar med hastighetsgränsen 50 km/h erhöles ett 0,3-2,0 s lägre kritiskt tidsavstånd för höger- än för vänstersvägande fordon. För fordon med körriktning rakt fram befanns det kritiska tidsavståndet vara ungefär detsamma som för vänstersvägande fordon, vilket möjligen strider mot tidigare undersökningar. En eventuell skillnad mot dessa kan bero på skillnaden i definitionen av överordnat flöde.

För tre korsningar (3, 10 och 15 i TABELL 2) bearbetades hög resp låg-trafikperioder separat, med i medeltal 50 - 100 % högre belastningsgrad för de förra än för de senare. Resultaten visar entydigt, liksom refererade tidigare undersökningar, på ett lägre kritiskt tidsavstånd vid högtrafik (här 0,4-0,8 s).

(b) Antal tillfarter

Skillnaderna mellan tre- och fyrvägs-korsningar i TABELL 2 (mätplats 3 relativt 4,6 relativt 9, etc) är inte signifikanta, vad avser kritiska tidsavståndet för svängande fordon.

(c) Antal körfält, överordnad led

Mätplatserna 2 (fyrfältig led) och 4 (tvåfältig) jämförs. En skillnad kan endast påvisas för högersvängande fordon. Detta strider mot tidigare undersökningar men kan inte tillmätas någon större vikt. Skillnaden för högersvängande fordon beror möjligen mer på den mindre konfliktvinkeln vid mätplats 2.

(d) Antal körfält, underordnad led

Mätplatserna 11 och 12 jämförs, varvid det kritiska tidsavståndet är 0,6 s lägre för tillfarten med två körfält än för tillfarten med ett körfält. Skillnaden kan möjligen delvis tillskrivas en något olika belastningsgrad. Tidigare resultat avseende inverkan av faktorn saknas.

(e) Separat körfält för vänstersvängande fordon

Skillnaden i kritiskt tidsavstånd för vänstersvängande fordon från överordnad led, mellan mätplatserna 10 och 15 som saknar resp har separat körfält för vänstersvängen, är inte signifikant.

(f) Accelerationskörfält för högersvängande fordon

Med fullt utbyggt accelerationskörfält, som för mätplats 16, är det kritiska tidsavståndet för högersvängande fordon lägre än vad som kunnat förväntas med en icke kanaliserad högersväng. Detta stämmer väl med tidigare undersökningar.

(g) Förekomst av mittremsa

Skillnaderna i kritiskt tidsavstånd, med de jämförelser som är möjliga i urvalet, medger knappast någon entydig slutsats. Ett signifikant resultat är emellertid att standardavvikelsen i det accepterade tidsavståndet är betydligt större med mittremsa (för korsande strömmar). En kritisk gräns för den bredd på mittremsan, då fordon regelmässigt utnyttjar möjligheten att korsa överordnade leden i etapper, torde vara ca 3-5 m (avser fyrfältig led).

(h) Regleringsform

Resultaten tyder på ett ca 0,3-0,6 s högre kritiskt tidsavstånd vid stopp-än vid väjningsplikt, vilket möjligen är mindre än vad tidigare undersökningar utvisat. Hela den uppmätta skillnaden hänför sig till skillnaden i det första kritiska tidsavståndet ("lag").

(i) Hastighetsgräns

I urvalet finns korsningar med 50, 70 och 90 km/h hastighetsgräns på överordnad led. Det kritiska tidsavståndet tycks vara ca 1 s högre vid 90 än vid 50 km/h, och kanske ca 0,7 - 0,8 s högre vid 70 än vid 50 km/h. Dessa resultat stämmer väl med tidigare undersökningar.

(j) Ortsstorlek

En jämförelse mellan resultaten från de tre korsningarna i Stockholm (10, 11 och 12) relativt likartade korsningar i övriga landet (t ex 1 och 6) visar att de kritiska tidsavstånden är ca 1 s lägre för de förstnämnda, även efter viss korrektion för skillnaden i belastningsgrad. Skillnaden mellan övriga mätplatser inbördes, beroende på ortsstorlek, kan inte påvisas.

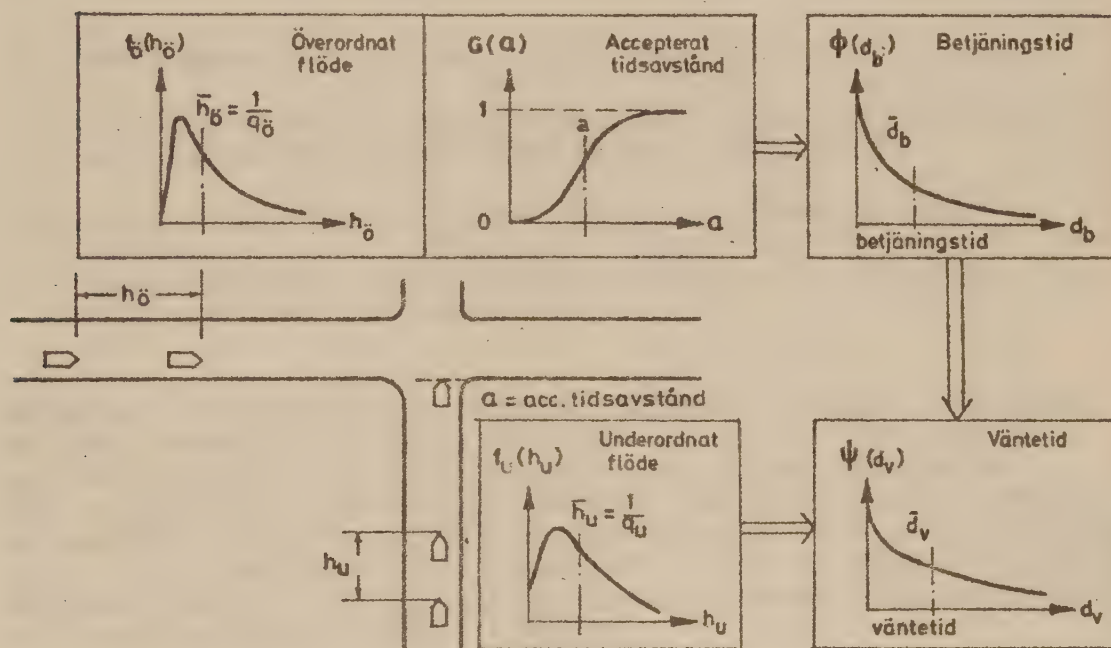
Sammanfattningsvis styrker de erhållna resultaten i huvudsak och så långt slutsatser är möjliga de hypoteser, avseende det kritiska tidsavståndets storlek och dess beroende av olika faktorer, som uppställts på grundval av litteraturinventeringen. Möjligheten att basera en beräkningsmodell avseende kapacitet och fördröjning på det kritiska tidsavståndet som parameter verkar därigenom inte orealistisk.

4 ANSATSER TILL EN BERÄKNINGSMODELL

4.1 Översikt

I kap 4.2-4.4 granskas olika möjligheter att med hjälp av köteori beräkna kapacitet, medelfördröjning etc för en tillfart med stopp- eller väjningsplikt.

De teoretiska beräkningsmodellerna utgår från den enkla interaktionen (kap 4.3). Principen för beräkning av fördröjningen (eg väntetiden) i ett sådant fall illustreras av FIGUR 4 nedan.



FIGUR 4 En modell för beräkning av väntetiden för underordnade fordon, i en enkel interaktion.

Betjäningstiden d_b bestäms primärt av dels tidsavståndsfördelningen $f_0(h_0)$ i det överordnade flödet, dels sannolikheterna $G(a)$ att dessa tidsavstånd accepteras av väntande fordon (de tre övre rutorna i figuren).

Beroende på olika teoretiska ansatser för funktionerna $f_0(h_0)$ och $G(a)$ erhålls olika uttryck för medelbetjäningstiden. Dessutom måste beaktas att betjäningstiden är något olika för förhållanden med resp utan kö i den underordnade tillfarten (figuren är en förenkling i detta avseende).

Väntetiden d_v för ett underordnat fordon kan beräknas ur dels tidsavståndsfördelningen i det underordnade flödet, $f_u(h_u)$, dels betjäningstidens fördelning. I praktiken kan denna beräkning endast genomföras för vissa antaganden beträffande de nämnda fördelningarna, vilket emellertid ofta ger tillräcklig noggrannhet. För beräkning av fördröjningen skall till väntetiden läggas accelerations- och retardationsförlusterna, vilka bestämts empiriskt under olika förhållanden.

I en verklig korsning förekommer normalt sådana enkla interaktioner mellan ett flertal olika par av fordonsströmmar (se t ex FIGUR 26). Vissa av interaktionerna kan avse korsande rörelser och andra konvergerande¹⁾. De effekter överlagringen av olika enkla interaktioner ger upphov till kan brytas ner till tre delproblem, vilka i kap 4.4 behandlas var för sig:

- i) den underordnade strömmen korsar flera överordnade strömmar
- ii) en (eller flera) av dessa överordnade strömmar kan i sin tur vara underordnad i förhållande till en annan ström
- iii) i den underordnade tillfarten blandas (i samma kö) flera strömmar, vilka är underordnade i förhållande till ett eventuellt olika antal överordnade strömmar och/eller har olika kritiska tidsavstånd.

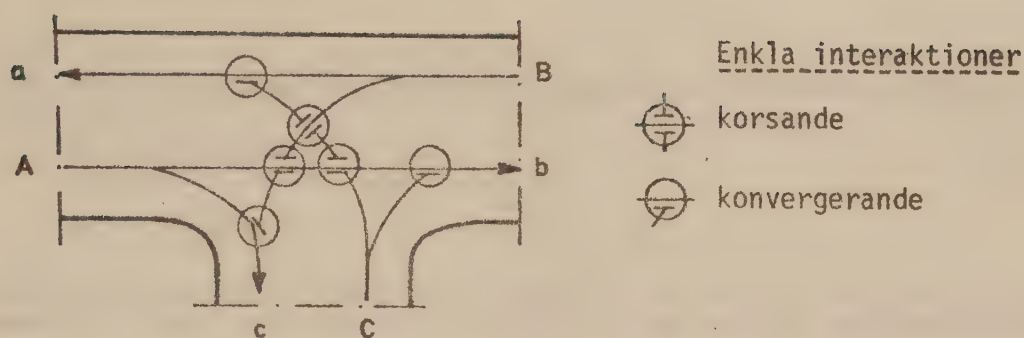
Betrakta t ex FIGUR 2b i avsnitt 2.2. Analysen genomförs i följande ordning: undersök först kapacitet, fördröjnings etc för strömmarna q_{Cv} och q_{Ch} var för sig och med hänsyn till interaktionerna med $(q_{Ar} + q_{Bv} + q_{Br})$ resp med q_{Ar} . Undersök därefter speciellt effekten av eventuell köbildning i tillfart B på grund av att q_{Bv} är underordnad $(q_{Ar} + q_{Ah})$. Beräkna slutligen kapacitet etc för tillfarterna C och B, såvida q_{Cv} och q_{Cr} resp q_{Bv} och q_{Br} blandas i samma kö och med hänsyn till antalet körfält i resp tillfarter.

Det definierade problemet (iii) inbegriper speciellt också det fall fordonskategorier med olika egenskaper blandas i samma kö. Problemet (ii) har speciellt intresse för korsningar med högerregel.

4.2 Beskrivning av konfliktsförhållanden

Av stor betydelse vid beräkning av t ex kapaciteten för en underordnad tillfart är vilka fordonsströmmar i korsningen som skall betraktas som överordnade, i förhållande till olika fordonsströmmar i den underordnade tillfarten. Jämför FIGUR 5 nedan, som avser en T-korsning.

- 1) Dessa båda typer av elementärfall behandlas här på samma sätt, vilket kan vara tillåtet när konfliktpunkterna är relativt väldefinierade (vilket t ex inte är fallet vid rampanslutningar).



FIGUR 5 Enkla interaktioner i en T-korsning med väjningsplikt

Betrakta t ex den vänstersvängande fordonsströmmen från tillfart C. Uppenbarligen är både vänstersvängande fordon från B och rakt fram körande fordon från A överordnade denna ström. Av flödet rakt fram från tillfart B bör emellertid, enligt de i kap 3.4 redovisade fältmätningarna, endast medräknas den del som färdas i körfältet närmast vägmitten, om frånfart a har mer än ett körfält (annars hela flödet Ba).¹⁾ Också enligt fältmätningarna skall endast den del av flödet Bb som färdas i kantstenskörfältet räknas som överordnat i förhållande till flödet Cb. Högersvängande fordon från tillfart A (strömmen Ac) kommer aldrig med i beräkningarna. Samma princip är tillämplig för fyrvägs-korsningar.

De nämnda resultaten, som är tämligen entydiga enligt fältundersökningen, skiljer sig på flera punkter från publicerade beräkningsmetoder (Jessen 1968, Roads in Urban Areas 1965).

4.3 Modeller för den enkla interaktionen

4.3.1 Beräkning av betjäningstid och kapacitet

Som tidigare nämnts är betjäningstiden något olika utan resp med kö i den underordnade tillfarten (d_b^0 resp d_b^k). Betrakta först det förstnämnda fallet, där betjäningstiden således utgör hela väntetiden. Detta motsvarar förhållandena vid en mycket låg belastningsgrad.

Medelvärdet av betjäningstiden under sådana förhållanden kan enkelt beräknas under följande antaganden:

- (1) det accepterade tidsavståndet är konstant = a
- (2) tidsavståndsfördelningen $f_0(h_0)$ för det överordnade flödet är en negativ exponentialfördelning med medelvärde $1/q_0$.

Sannolikheten att ett inkommande fordon tvingas vänta exakt n tidsavstånd blir

$$\rho^n (1-\rho) \quad \dots (4)$$

där ρ , sannolikheten att ett tidsavstånd avvisas, är

$$\rho = 1 - e^{-aq_0} \quad \dots (5)$$

1)

Saknas markerade körfält bör frånfartens bredd beaktas

Den genomsnittliga längden av de tidsavstånd som avvisas måste vara

$$\frac{\int_0^a h_{\bar{o}} f_{\bar{o}}(h_{\bar{o}}) dh_{\bar{o}}}{\int_0^a f_{\bar{o}}(h_{\bar{o}}) dh_{\bar{o}}} = \frac{1}{q_{\bar{o}}} - \frac{a}{e^{aq_{\bar{o}}} - 1} \quad \dots (6)$$

Multiplikeras detta uttryck med medelvärdet av fördelningen (4), som är $\rho/(1-\rho)$, och insätts ρ enligt (5) så erhålls medelbetjäningstiden

$$\bar{d}_b^o = \frac{1}{q_{\bar{o}}} (e^{aq_{\bar{o}}} - aq_{\bar{o}} - 1) \quad \dots (7)$$

Även variansen i betjäningstiden kan beräknas och blir, vid samma förutsättningar,

$$\text{Var} (d_b^o) = \frac{1}{(q_{\bar{o}})^2} (e^{2aq_{\bar{o}}} - 2aq_{\bar{o}} e^{aq_{\bar{o}}} - 1) \quad \dots (8)$$

Härledningen av medelbetjäningstiden, motsvarande formel (7), kan självfallet göras för vilken som helst tidsavståndsfördelning $f_{\bar{o}}(h_{\bar{o}})$. Om t ex istället ansätts en Erlang-fördelning, som har ett mindre förhållande (k) mellan standardavvikelse och medelvärde än exponentialfördelningen ($k=1$), så ökar medelbetjäningstiden. Ansätts en hyperexponentialfördelning ($k>1$), så minskar medelbetjäningstiden.

Vissa beräkningar har även gjorts vid andra antaganden avseende de accepterade tidsavstånden än enligt (1) ovan, se t ex Weiss och Maradudin 1962. Den beräknade effekten av sådana alternativa antaganden är normalt försumbar för praktiska tillämpningar.

Betrakta nu det andra extremfallet att en kö av fordon ständigt väntar i den underordnade tillfarten, vilket är tillämpligt för belastningar nära eller över kapaciteten. Antag först:

- (1) det accepterade tidsavståndet är konstant och $= a_g$ för ett fordon, $a_g + a_f$ för två fordon, $a_g + 2a_f$ för tre fordon etc
- (2) tidsavståndsfördelningen $f_{\bar{o}}(h_{\bar{o}})$ är en negativ exponentialfördelning med medelvärde $1/q_{\bar{o}}$.

Exakt i fordon kommer att utnyttja ett tidsavstånd $h_{\bar{o}}$ och endast om

$$a_g + (i-1)a_f < h_{\bar{o}} < a_g + i \cdot a_f \quad \dots (9)$$

Andelen tidsavstånd som ligger inom intervallet (9) är

$$q_{\bar{o}} (e^{-q_{\bar{o}} \cdot [a_g + (i-1)a_f]} - e^{-q_{\bar{o}} \cdot (a_g + i \cdot a_f)}) = P_i$$

(definition av P_i), vilket ger kapaciteten

$$K = \sum_{i=1}^{\infty} P_i \cdot i = q_{\bar{o}} \frac{e^{-a_g q_{\bar{o}}} (1 - e^{-a_f q_{\bar{o}}})}{(1 - e^{-a_f q_{\bar{o}}})} \quad \dots (10)$$

Uttrycket (10) för kapaciteten refereras av Harders 1968, Tanner 1962 m fl och har vid praktisk tillämpning befunnits ge acceptabla resultat (Owens 1969).

För betjäningstiden vid kö erhålls således

$$\bar{d}_b^k = 1/K = \frac{1}{q_0} (e^{a_g q_0} - e^{q_0(a_g - a_f)}) \quad \dots(11)$$

Liksom vid förhållanden utan kö kan betjäningstiden vid kö, enligt (11), härledas för andra antaganden avseende tidsavståndsfördelning och accepterade tidsavstånd än de givna. Inverkan blir också av samma storleksordning. Se t ex Siegloch 1973, som med hjälp av simulering beräknat inverkan på kapaciteten av olika tidsavståndsfördelningar.

En jämförelse mellan uttrycken (7) och (11) för betjäningstiden utan resp med kö visar att skillnaden som störst är av samma storleksordning som följdtiden, a_f . Följdtiden är just den extra tid som drabbar fordon som väntat i kö innan den egentliga "betjäningen" påbörjas, jämfört med fordon som anländer utan kö.

Eftersom sannolikheten att hejdas av kö är proportionell mot belastningsgraden (B), så kan en enkel approximativ ansats för betjäningstiden vid viss belastningsgrad mellan 0 (ej kö) och 1,0 (ständig kö) vara t ex

$$\bar{d}_b \approx B \cdot \bar{d}_b^k + (1-B) \cdot \bar{d}_b^0 \quad \dots(12)$$

med $\bar{d}_b^0$ och $\bar{d}_b^k$ enligt ovan.

Den största osäkerheten vid beräkning av betjäningstiden, fortfarande för en enkel interaktion, ligger säkert i bestämningen av det kritiska tidsavståndet (och följdtiden) och i bestämningen av det överordnade flödet q_0 .

Det närmast största felet kan vara svårigheten att förutsäga tidsavståndsfördelningen i det överordnade flödet. Den negativa exponentialfördelningen, motsvarande en s k ostörd fordonsström, är endast tillämplig för låga flöden per körfält. Ett tämligen stort antal undersökningar föreligger avseende tidsavståndsfördelningar vid olika flöden och på olika typer av trafikleder, men kan inte refereras här. Se t ex Greenberg 1963, Haight 1959 och Tanner 1961. Särskilda svårigheter vid beräkningen uppstår om tidsavståndsfördelningen påverkas av samordnad signalreglering i närliggande korsningar.

Betjäningstiden enligt formel (12) bör i en verklig korsning eventuellt korrigeras m h t vissa speciella förhållanden, som förekomst av gång- och cykeltrafik. T ex kan gång- och cykeltrafikanter, som korsar den underordnade fordonsströmmen och reellt lämnas företräde, tänkas inräknade i det överordnade flödet. Korrektionen m h t samverkan mellan olika enkla interaktioner behandlas i kap 4.4.

4.3.2 Beräkning av väntetid

Väntetiden beräknas enligt köteorin som funktion av dels betjäningssprocessen, dels ankomstprocessen. Det enklaste fallet (s k M/M/1-kö) erhålls vid följande antaganden:

Ankomstprocess: tidsavstånden mellan successiva ankomster är oberoende och följer en negativ exponentialfördelning med medelvärde $1/q_u$.

Betjäningssprocess: betjäningstiderna för olika ankommande fordon är oberoende och följer en negativ exponentialfördelning med medelvärde $\bar{d}_b$.

(Dessutom förutsätts att ankommande fordon betjänas ett och ett i ordning efter ankomst, vilket definitionsmässigt är sant för den enkla interaktionen).

Med nämnda förutsättningar blir väntetidens medelvärde

$$\bar{d}_v = \bar{d}_b \left(1 + \frac{q_u \bar{d}_b}{1 - q_u \bar{d}_b} \right) \quad \text{..(13)}$$

Väntetiden närmar sig oändligheten då belastningsgraden (B)

$$B = q_u \bar{d}_b \approx q_u / K \quad \text{..(14)}$$

närmar sig 1,0. Vid låg belastningsgrad blir skillnaden mellan väntetid och betjäningstid liten.

Den nämnda förutsättningen beträffande ankomstprocessen, motsvarande s k "ostört flöde" i den underordnade tillfarten (före anslutning till kön), torde oftast vara realistisk. Undantag kan t ex vara fall, där en signalreglerad korsning är belägen strax uppströms tillfarten. För vissa kvantitativa uppskattningar avseende andra ankomstprocesser se Hawkes 1965.

Den förutsättning avseende betjäningssprocessen, som ligger till grund för (13), finns det starkare skäl att ifrågasätta. Betjäningstiderna följer inte en negativ exponentialfördelning, utan något betydligt mer komplicerat, ¹⁾ och är heller inte helt oberoende av varandra.

Förutsätts fortfarande att successiva betjäningstider är oberoende kan väntetidens medelvärde ändå beräknas enkelt, enligt den s k Pollaczek's väntetidsformel:

$$\bar{d}_v = \bar{d}_b \left(1 + \frac{B}{1-B} \cdot \frac{1+c^2}{2} \right) \quad \text{..(15)}$$

1)

I enklaste fall och vid låg belastningsgrad en s k Garwood-fördelning

där c är kvoten mellan betjäningstidens standardavvikelse och dess medelvärde samt där $B = q_u \bar{d}_b$ (belastningsgraden).

Formel (15) gäller helt oavsett betjäningstidens fördelning för övrigt. Med en negativ exponentialfördelning, för vilken standardavvikelse = medelvärde, erhålls $c=1$ och formlerna (13) och (15) blir identiska. Med $\bar{d}_b$ enligt formel (7) och $\text{Var}(d_b)$ enligt formel (8), så blir c större än 1 (skillnaden ökar med avtagande q_0) och väntetiden således större än enligt (13).

Vid beräkning av c bör helst också beaktas att betjäningstiden, enligt avsnitt 4.3.1, är större för fordon som väntat i kö än för övriga fordon. Inverkan härav är dock liten. Jämför Siegloch 1973, som gör vissa kvantitativa uppskattningar.

Beroendet mellan successiva betjäningstider kan främst förklaras av skillnaden i betjäningstid mellan fordon som väntat resp inte väntat i kö. Tanner 1962 beräknar emellertid medelväntetiden på sannolikhets-teoretisk väg och med följande förutsättningar:

- (1) det accepterade tidsavståndet är konstant och $= a_g$ för ett fordon, $(a_g + a_f)$ för två fordon, etc
- (2) tidsavståndsfördelningarna i både det överordnade och det underordnade flödet följer negativa exponentialfördelningar, med medelvärden $1/q_0$ resp $1/q_u$.

Följande resultat erhålls för medelväntetiden:

$$\bar{d}_v = \frac{e^{a_f q_0} (e^{a_g q_0} - a_g q_0 - 1) + \frac{q_u}{q_0} e^{a_g q_0} (e^{a_f q_0} - a_f q_0 - 1)}{q_0 e^{a_f q_0} - q_u e^{a_g q_0} (e^{a_f q_0} - 1)} \quad \dots (16)$$

(Tanner 1962 beräknar även medelväntetiden vid en s k M/D/1 tidsavståndsfördelning i det överordnade flödet).

Nämnumaren i (16) blir $= 0$ för $q_u = K$ enligt formel (10), som bygger på motsvarande förutsättningar. Uttrycken (15) och (16) för medelväntetiden har således samma asymptot, om $\bar{d}_b$ beräknas enligt (12), (11) och (7). Uttrycken sammanfaller då också för q_u nära noll ($\bar{d}_v = \bar{d}_b^0$). I övrigt ger formel (15), med $\bar{d}_b$ enligt (12), (11) och (7), en generellt något högre väntetid än (16).

Denna skillnad mellan kömodellen (15) och den sannolikhetssteoretiska modellen (16) beror således på att beroendet mellan successiva betjäningstider försummas i formel (15). För tillämpningar i en beräkningsmetod är den köteoretiska modellen att föredraga, emedan den enklare kan generaliseras. Det nämnda beroendet kan därvid beaktas t ex genom en korrektion av variationskoefficienten c i formel (15). Den erforderliga korrektionen kan uppskattas vid en jämförelse mellan (15) och (16) och beror i första hand av belastningsgraden.

- 1) Ytterligare faktorer som orsakar beroendet är att "lag" och "gap" kan vara olika, samt att tidsavståndsfördelningen i det överordnade flödet inte exakt följer en negativ exponentialfördelning.

Standardavvikelsen i väntetiden är av intresse vid beräkning av fördröjningens högre percentiler, men kan såvitt bekant inte beräknas analytiskt. Vissa simuleringsresultat, se Siégloch 1973, antyder att väntetidens statistiska fördelning grovt approximativt följer en negativ exponentialfördelning. Om så är fallet kan den väntetid (d_v) max, som endast överskrids av en andel P_v av ankommande fordon, beräknas med hjälp av uttrycket

$$(d_v)_{\max} = \bar{d}_v \cdot (-\ln P_v) \quad \dots(17)$$

där $\bar{d}_v$ är medelvärdet enligt t ex formel (15).

Vid belastningsgraden nära 1,0 blir osäkerheten i beräkningen av medelväntetiden stor. Därtill kommer att trafikantbeteendet sannolikt förändras vid en hög belastningsgrad. De beskrivna teoretiska modellerna är således inte tillämpliga i sådana fall. Var gränsen skall sättas är en fråga om vilka fel som kan accepteras. Vissa observationer från fältstudierna (se kap 3.4), dock endast avseende en korsning, tyder på att ett värde kring 0,80-0,85 kan vara rimligt som övre gräns för belastningsgraden, med hänsyn till noggrannheten i beräkningen.

4.3.3 Beräkning av kölängd och andel stopp

Det antal fordon, som i medeltal väntar i kö då ett fordon ankommer (inklusive det första betjänade fordonet), blir med mycket allmänna förutsättningar

$$\bar{N} = \bar{d}_v \cdot q_u \quad \dots(18)$$

där $\bar{d}_v$ är medelväntetiden. För beräkning av kölängdens högre percentiler erfordras emellertid hela frekvensfunktionen, vilken endast kan beräknas analytiskt vid mycket enkla förutsättningar. Med kömodellen M/M/1, dvs samma förutsättningar som gällde för formel (13) avseende väntetiden, erhålls sannolikheten P_n för n fordon i kö som

$$P_n = B^n(1-B) \quad \dots(19)$$

där B är belastningsgraden. Denna modell underskattar emellertid något sannolikheten för långa köer. En första åtgärd bör vara att korrigera formel (19) så att medelvärdet för n , som enligt (19) blir

$$\bar{N} = B / (1-B) \quad \dots(20)$$

överensstämmer med medelvärdet enligt (18). Se vidare Evans, Herman och Weiss 1964 som visar på en lösningsmetod vid något mer allmänna förutsättningar.

Sannolikheten P_0 att inga fordon finns i tillfarten då ett fordon anländer blir speciellt, enligt (19),

$$P_0 = 1-B \quad \dots(21)$$

Detta uttryck kan visas gälla vid mycket allmänna förutsättningar.

För att ett fordon (vid väjningsplikt) skall slippa stanna krävs emellertid också att det första tidsavståndet accepteras. Sannolikheten P_f att så är fallet blir, vid t ex ett konstant kritiskt tidsavstånd a_1 och en negativ exponentialfördelning för tidsavstånden i det överordnade flödet,

$$P_f = e^{-a_1 q_0} \quad \text{..(22)}$$

Andelen fordon P_s som tvingas stanna blir således (vid just de nämnda förutsättningarna)

$$P_s = 1 - P_0 \cdot P_f = 1 - (1-B) \cdot e^{-a_1 q_0} \quad \text{..(23)}$$

Generaliseringen av (22) och (23) till andra förutsättningar är enkel.

För tillfarten med väjningsplikt kommer fördröjningen under körning att bero av andelen stoppande fordon, emedan fordon som stannar drabbas av större accelerationsförluster än övriga.

Förutsättningarna för praktisk tillämpning av formlerna (18) och (23) är desamma som för formlerna avseende väntetiden, dvs deras giltighet är begränsad till en viss högsta belastningsgrad. För beräkning av kölängdens högre percentiler tillkommer som nämnts ytterligare ett fel som är svårt att uppskatta, samt dessutom (och även för medelkölängden) osäkerheten vid omräkning från antal fordon till kölängd i meter.

4.4 Mödifiering m h t överlagrade interaktioner

4.4.1 Inverkan av flera överordnade fordonsströmmar

Vid beräkning avseende den enkla interaktionen i kap 3.3. förutsattes att det överordnade flödet q_0 endast utgjordes av en fordonsström i ett körfält. Detta gäller i en verklig korsning för t ex högersvängande fordon från en underordnad tillfart (jämför kap 4.2).

För t ex fordon som kör rakt fram i en fyrvägs-korsning med stopp- eller väjningsplikt finns emellertid normalt överordnade fordonsströmmar både från vänster (rakt fram körande och vänstersvängande) och från höger (alla tre körriktningarna). I var och en av de två överordnade tillfarterna kan finnas ett eller flera körfält.

Bortse här från effekten av att någon av de överordnade fordonsströmmarna i sin tur kan vara underordnad en annan fordonsström (denna effekt behandlas i 4.4.2). Som regel kan då tidsavståndsfördelningarna i de olika överordnade fordonsströmmarna antagas vara oberoende av varandra.¹⁾

1)

Ett undantag kan vara de två körriktningarna på en överordnad led med samordnad signalreglering.

Dessa tidsavståndsfördelningar, för samtliga överordnade fordonsströmmar, skall för beräkning av betjäningstiden enligt avsnitt 4.3.1 ersättas av en tidsavståndsfördelning. Denna skall beskriva frekvenserna av olika tidsavstånd mellan överordnade fordon, oavsett körriktning och körfält. Den resulterande tidsavståndsfördelningen, och speciellt t ex dess medelvärde $\bar{h}_0 = 1/q_0$, blir självfallet olika för olika underordnade fordonsströmmar (enligt kap 4.2).

Antag t ex att tidsavståndsfördelningarna

$f_{01}(h_{01})$, $f_{02}(h_{02})$..

för de enskilda överordnade fordonsströmmarna 1,2.. är kända. Den sammansatta frekvensfunktionen kan då beräknas med (i övrigt) helt allmänna förutsättningar, se t ex Haight 1963.

Om speciellt $f_{01}(h_{01})$, $f_{02}(h_{02})$ etc alla är negativa exponentialfördelningar, med medelvärden $\bar{h}_{01} = 1/q_{01}$, $\bar{h}_{02} = 1/q_{02}$ etc så blir också $f_0(h_0)$ en negativ exponentialfördelning med medelvärdet

$$\bar{h}_0 = 1/q_0 = 1/(q_{01} + q_{02} + \dots) \quad \dots (24)$$

Dvs de överordnade flödena kan adderas.

Uppmätta tidsavståndsfördelningar (se referenser i avsnitt 4.3.1) avser emellertid oftast flödet i en riktning på en väg, oavsett fordonens val av frånfart i korsningen. Om dessa tidsavståndsfördelningar är negativa exponentialfördelningar blir formel (24) ändå tillämplig.¹⁾

I annat fall bör beaktas att tidsavståndsfördelningens parametrar ändras: t ex blir sannolikheten för mycket små tidsavstånd (under 2-3 s) större i en fördelning som avser två körriktningar på en tvärlätsväg än i en fördelning som avser en körriktning.

4.4.2 Inverkan av fordonsströmmar som är både över- och underordnade

Betrakta t ex den vänstersvängande fordonsströmmen Ca från den underordnade tillfarten C i FIGUR 5. Denna är underordnad de båda rakt fram körande fordonsströmmarna Ab och Ba, men också den vänstersvängande fordonsströmmen Bc.

Bortses från att den sistnämnda strömmen i sin tur är underordnad i en annan konflikt (med Ab), så skulle betjäningstiden för strömmen Ca beräknas m h t det totala överordnade flödet

$$q_0 = q_{Ab} + q_{Ba} + q_{Bc}$$

Konflikten mellan strömmarna Ab och Bc påverkar emellertid tidsavståndsfördelningen för detta flöde (mätt i konfliktpunkterna) i väsentlig grad. Vidare kan ett fordon i strömmen Ca som regel inte utnyttja tillgängliga, tillräckligt stora tidsavstånd under den tid då minst ett fordon i strömmen Bc väntar i kö. Strömmen Bc, som således är överordnad Ca men underordnad Aa, sägs i fortsättningen vara sekundärt överordnad i förhållande till Ca.

1) Det förutsätts också att successiva fordons val av frånfart är oberoende, vilket oftast torde vara fallet.

Beteckna med B_{US} och K_{US} belastningsgrad resp kapacitet för den sekundärt överordnade fordonsströmmen, i exemplet strömmen B_c . Beteckna med B_u och K_u belastningsgrad resp kapacitet för den underordnade strömmen (i exemplet C_a), beräknad utan hänsyn till att en av de överordnade strömmarna är sekundärt överordnad (dvs enligt avsnitt 4.3.1 och 4.4.1).

En enkel ansats, diskuterad av Harders 1968 och Siegloch 1973 samt tillämpad i tyska beräkningsanvisningar, är följande: andelen tid under vilken tidsavstånd inte kan utnyttjas av underordnade fordon, även om de är tillräckligt stora, är ungefär lika med sannolikheten att kö inte finns i den sekundärt överordnade fordonsströmmen, dvs $(1-B_{US})$. Kapaciteten för den underordnade fordonsströmmen skall därför approximativt reduceras med faktorn $(1-B_{US})$ och belastningsgraden således korrigeras till

$$(B_u)_{\text{kor}} \approx B_u / (1-B_{US}) \quad \dots (25)$$

Också medelbetjäningstiden korrigeras med faktorn $1/(1-B_{US})$. Förekommer flera sekundärt överordnade fordonsströmmar antages att de olika korrektionsfaktorerna $(1-B_{US})$ är multiplikativa, dvs att sannolikheterna för kö i resp fordonsström är oberoende.

För det enkla fallet att endast två överordnade fordonsströmmar förekommer (A_b och B_c), varav den ena (B_c) är sekundärt överordnad, så är en något mindre approximativ ansats möjlig. Med köteoretiska termer motsvarar problemet en kömodell med två typer av "kunder", vilka båda betjänas i samma kö men där kunder av den ena typen alltid betjänas före kunder av den andra typen (s k "preemptive priority"). Se t ex Jaiswal 1960. Ansatsen bör vara möjlig att generalisera.

Beräkningar av t ex medelbetjäningstiderna för olika underordnade strömmar i en korsning måste således utföras i viss ordning, emedan vissa av strömmarna i sin tur kan vara sekundärt överordnade andra. I vissa fall, t ex i en fyrvägs korsning med högerregel, blir ordningsföljden inte entydig utan ett iterativt förfarande måste tillgripas.

4.4.3 Inverkan av flera underordnade fordonsströmmar

I avsnitt 4.3.1 har beskrivits hur betjäningstiden (eg dess medelvärde och varians) kan beräknas för en underordnad fordonsström, och i avsnitt 4.4.1 - 4.4.2 hur vissa faktorer i konfliktförhållandena därvid kan beaktas.

Om fordonsströmmen ensam disponerar två eller flera körfält i tillfarten så krävs vissa antaganden om ankommande fordons beteende vid val av körfält. Den enklaste och oftast utnyttjade hypotesen är att ankomsterna i de olika körfälten är oberoende och har samma frekvens. Belastningsgrad, väntetid m m erhålls därvid på samma sätt som med ett körfält, men med flödet q_u utbytt mot q_u/n_k där n_k är antalet körfält.

Detta beräkningssätt ger mellertid en viss överskattning av väntetiden, eftersom ankommande fordon med större sannolikhet väljer den kortaste kön. Betraktas ett körfält blir tidsavstånden mellan successiva ankomster därigenom beroende av varandra. Detta förhållande försvårar avsevärt en teoretisk behandling. Effekten har såvitt bekant heller inte evaluerats.

Betrakta nu det fall då flera underordnade fordonsströmmar samsas om ett körfält, vilket är det i verkligheten vanligaste. Ett enkelt förfarande, som såvitt bekant inte förut tillämpats är följande: beräkna medelvärde och varians för den fördelning av betjäningstiden, som gäller för de olika fordonsströmmarna sammantagna. Beräkna därefter t ex väntetiden enligt formel (15), med denna medelbetjäningstid och denna varians.

Om sannolikheten att ett ankommande fordon tillhör en viss fordonsström (t ex högersvängande) är oberoende av det framförvarande fordonets körriktning, vilket i allmänhet är sant¹⁾, så erhålls för det sammansatta medelvärdet ($\bar{d}_b$):

$$\bar{d}_b = p_1 d_{b1} + p_2 d_{b2} + \dots \quad \dots (26)$$

där $\bar{d}_{b1}$, $\bar{d}_{b2} \dots$ är medelbetjäningstiden för resp fordonsström och p_1 , $p_2 \dots$ fordonsströmmarnas resp andelar av det underordnade flödet i körfältet. Variansen för den sammansatta fördelningen erhålls approximativt som

$$\begin{aligned} \text{Var}(d_b) &= p_1 \text{Var}(d_{b1}) + p_2 \text{Var}(d_{b2}) + \dots \\ &+ p_1 \bar{d}_{b1}^2 + p_2 \bar{d}_{b2}^2 + \dots - \bar{d}_b^2 \end{aligned} \quad \dots (27)$$

där $\text{Var}(d_{b1})$ etc avser de enskilda fordonsströmmarna och $\bar{d}_b$ beräknas enligt (26).

Om flera överordnade fordonsströmmar gemensamt delar på flera körfält är följande enkla ansats närliggande: beräkna betjäningstiden (eg dess medelvärde och varians) för fordonsströmmarna gemensamt enligt (26)-(27). Antag därefter att belastningsgraden är lika i alla körfält, dvs för ett körfält erhålls

$$B = q_u \bar{d}_b / n_k \quad \dots (28)$$

där q_u är det totala ankommande flödet (oavsett fordonsström), $\bar{d}_b$ medelbetjäningstiden enligt (26) och n_k antalet gemensamma körfält. Ansatsen innebär att den beräknade medelkörlängden blir lika stor i alla dessa körfält. Om en fordonsström har ett exklusivt körfält skall dess belastningsgrad självfallet beräknas separat.

4.5 Sammanfattning av beräkningsmodellen

Möjligheterna till utveckling av en praktiskt användbar beräkningsmetod, avseende inte bara belastningsgraden (eller kapaciteten) utan också t ex fördröjning och körlängder, förefaller goda mot bakgrund av genomgången enligt kap 4.2 - 4.4.

1)

Undantag kan vara fall då t ex en signalreglerad korsning är belägen strax uppströms tillfarten

Sammanfattningsvis kan en sådan beräkningsmetod ha följande uppläggning:

- (1) Beskrivning av konfliktförhållanden. För varje underordnad fordonsström bestäms de överordnade och de sekundärt överordnade fordonsströmmarna.
- (2) Beräkning av betjäningstid. Betjäningstidens medelvärde och varians beräknas separat för varje underordnad fordonsström, med utgångspunkt från dels det kritiska tidsavståndet (och följdtiden), dels det överordnade flödets sammansatta tidsavståndsfördelning (enligt mom 4.4.1). Den så erhållna betjäningstiden korrigeras m h t förekomsten av sekundärt överordnade fordonsströmmar, t ex enligt mom 4.4.2. Belastningsgraden för de körfält eller tillfarter, där sådana strömmar förekommer, måste således beräknas först.
- (3) Beräkning av kapacitet och belastningsgrad. Om flera fordonsströmmar förekommer i samma tillfart, utan exklusiva körfält, så beräknas betjäningstidens medelvärde och varians för dessa gemensamt, t ex enligt mom 4.4.3. Kapacitet och belastningsgrad erhålls därefter enligt mom 4.3.1 och 4.4.3.
- (4) Beräkning av väntetid och körlängder. Medelväntetiden, medelkörlängden och andelen stoppade fordon för ett körfält kan nu beräknas, t ex som beskrivits i mom 4.3.2 och 4.3.3.

För beräkning av fördröjningen skall till väntetiden läggas vissa accelerations- och retardationsförluster, vilka inte behandlats här.

Framställningen i kap 4.2 - 4.4 är endast exemplifierande och ett avsevärt arbete återstår, avseende t ex avaluering av innebörden i olika approximationer, metoder att beakta vissa, ovan ej omnämnda förhållanden som t ex korta körfält, framtagning av parametervärden för t ex tidsavståndsfördelningar vid olika förhållanden samt, sist men inte minst, validering av metoderna.

4.6 Några empiriska resultat

Publicerade mätvärden avseende t ex fördröjningen, i korsningar med stopp- eller vöjningsplikt, är få och medger inga generaliserbara slutsatser. Vid den i kap 3.4 beskrivna fältundersökningen mättes också fördröjningen, eller snarare vissa av dess komponenter (definierade i avsnitt 3.4.3).

Resultaten har bearbetats för sex mätplatser (= sex olika underordnade tillfarter). För varje mätpass, å 20-30 min, erhöles medelväntetid och medelbetjäningstid (största observerade värden var 42,6 resp 9,5 s). Med utgångspunkt från dels uppmätta flöden, dels bestämda kristiska tidsavstånd och följdtider beräknades en teoretisk medelväntetid och en teoretisk medelbetjäningstid.

Vid dessa teoretiska beräkningar utnyttjades det i kap 4.2 - 4.5 antydda förfarandet. Betjäningstidernas medelvärden beräknades enligt formel (12), varvid genomgående förutsattes negativa exponentialfördelningar för flödena i samtliga fordonsströmmar, och korrigerades m h t sekundärt överordnade flöden. Väntetidernas medelvärden beräknades enligt formel (15).

Totalt för de sex mätplatserna erhöles på så sätt 55 värdepar avseende uppmätt resp teoretisk medelväntetid ($\bar{d}_{vu}$ resp $\bar{d}_{vt}$). Med lineär regression erhöles sambandet

$$\bar{d}_{vt} = -0,61 + 1,18 \bar{d}_{vu} \quad (\text{sekunder}) \quad \dots (29)$$

Andelen förklarad varians, 79%, får anses tillfredsställande. Dock överskattades tydligen medelväntetiden systematiskt vid den teoretiska beräkningen. En närmare analys tyder på att sambandet är konvext uppåt samt att felet, vid konstant $\bar{d}_{vm}$, är störst vid höga underordnade flöden. Överskattningen kan eventuellt förklaras av att beroendet mellan betjäningstiderna för successiva fordon försumrats vid beräkningen (jämför avsnitt 4.3.2).

Insätts vid beräkning av väntetiden de uppmätta betjäningstiderna istället för de beräknade, så ökar andelen förklarad varians till 91%. Sambandet är dock fortfarande konvext uppåt (större överskattning vid större väntetid), vilket styrker misstanken att det systematiska felet snarare ligger i formel (15) än i formel (12).

Att så är fallet bekräftas ytterligare vid en regression av beräknade betjäningstider ($\bar{d}_{bt}$) på de faktiskt uppmätta ($\bar{d}_{bm}$) för enskilda fordonsströmmar:

$$\bar{d}_{bt} = 1,11 + 1,05 \bar{d}_{bm} \quad (\text{sekunder}) \quad \dots (30)$$

($R^2 = 85\%$). Ingen systematik i felet kunde påvisas. Den förklarade variansen (15%) torde till stor del bero på den enkla ansatsen avseende tidsavståndsfördelningarna, vilka inte mättes. Felen är störst för vänstersvängande och minst för högersvängande fordonsströmmar, säkert delvis beroende på att medelbetjäningstiden är störst för de förstnämnda men kanske delvis också på det enkla förfarandet vid korrektion för sekundärt överordnade fordonsströmmar.

Den genomförda testen av de teoretiska formlerna är självfallet för liten för att kunna betraktas som en validering, främst emedan endast några få olika korsningar är representerade. Resultatet måste ändå betecknas som uppmuntrande, avseende möjligheten att utveckla användbara beräkningsmetoder.

LITTERATURFÖRTECKNING

- Ashworth, R A note on the selection of gap-acceptance criteria for traffic simulation studies. Transportation Research Vol 3 No 3 1968
- Bissell, H Traffic gap acceptance from a stop sign. ITTE University of California 1960
- Drew, D Stochastic considerations in freeway operations and control. Texas Transp. Inst Report 24-5 1965
- Evans, D
Herman, R
Weiss, G The highway merging and queueing problem. Operations Research Vol 12 pp 832-857 1964
- Grabe, W Leistungsermittlung von nicht lichtsignalgeregelten Knotenpunkten des Strassenverkehrs. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Neue Folge Heft 11 1954
- Greenberg, H A vehicular headway distribution for tunnels. Highway Research Board News No 9 1963
- Haight, F The generalized Poisson distribution. ITTE Reprint No 80 1959
- Haight, F Mathematical theories of traffic flow. AP New York 1963
- Harders, J Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischen Verkehrsknoten. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik Heft 76 1968
- Hawkes, A Queueing for gaps in traffic. Biometrika Vol 52 pp 79-85 1965
- HMSO Roads in urban areas. HMSO London 1966
- HRB Highway capacity manual. Highway Research Board Special Report 87 1965
- Jaiswal, N Time Dependent Solution of the Bulk-service Queueing Problem. Operations Research Vol 8 No 6 1960
- Jessen, G Ein Richtlinienvorschlag für die Behandlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Signalregelung. Strassenverkehrstechnik Vol 12 Nr 7/8 1968
- Krell, K Ermittlung der Leistung ungesteuerter Strassenknoten mit Hilfe der Zeitlückentheorie. Strassenverkehrstechnik Vol 2 Nr 8 1958

- Leutzbach, W Ein Beitrag zur Zeitlückenverteilung gestörter Strassenverkehrsströme. Dissertation TH Aachen 1956
- Linseman, K A study of driver behaviour at stop sign intersections. Proceedings of the 1966 Convention Canadian Good Roads Association 1966
- Miller, A Nine estimators of gap-acceptance parameters. Proceedings, 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation Berkeley 1971
- NCHRP Effect of control devices on traffic operations - interim report. NCHRP Report 11 1964
- Nordqvist, S Gators och vägars kapacitet. IVA TFK Med Nr 39 1958
- OECD Capacity of at-grade junctions. Research Group T8 Preliminary Report 1973
- Owens, D Flow measurements at a number of uncontrolled T-Junctions. RRL Report LR 171 1969
- Raff, M A volume warrant for urban stop signs. The Eno foundation for Highway Traffic Control Sangatrack 1950
- Rörbech, J Critical lag in at-grade intersections. Traffic Engineering & Control Vol 8 No 8 1966
- Siegloch, W Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik Heft 154 1973
- Solberg, P Lag and gap acceptances at stop controlled intersections. Oppenlandher, J Highway Research Record 118 1966
- Statens Vägverk Kapacitetsutredning. Litteraturstudier och analys. Statens Vägverk 1973-10 TV 118 1973
- Tanner, J The delay to pedestrians crossing a road. Biometrika Vol 38 pp 383-392 1951
- Tanner, J A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection. Biometrika Vol 49 pp 163-170 1962
- Tsongos, N Comparison of day and night gap-acceptance probabilities. Public Roads Vol 35 No 7 1969
- Wagner, F An evaluation of fundamental driver decisions and reactions at an intersection. Highway Research Record 118 1966
- Weiss, G Some problems in traffic delay. Operations Research Maradudin, A Vol 10 pp 74-104 1962

Viinikka, J

Kapacitet vid en förkörsberättigad vägkorsning
(Stencil) 1970

Wörner, R

Ein Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit
von Strassen und unregelmässigen Verkehrsknoten mit
Hilfe der Theorie der Zeitlücken. Forschungsarbeiten
aus dem Strassenwesen Neue Folge Heft 55 1963

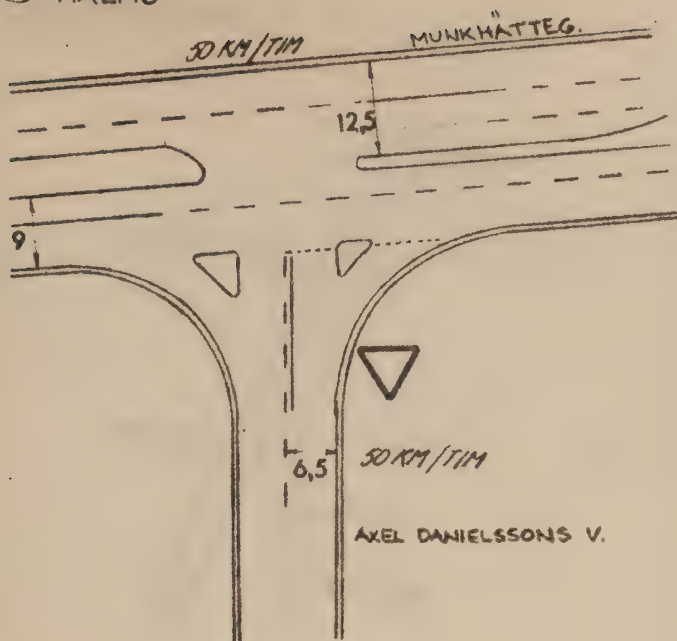
APPENDIX 1 BESKRIVNING AV MÄTPLATSERNA

Nr	Läge		Inkommande flöde
	Ort (län)	Korsning	
1	Malmö	Munkhätteg - Axel Danielssons v	12000
2	Malmö	Pildammsv - Ärtholmsv	19500
3	Lomma	v 110 - Vinstorspv	9500
4	Lund	Vikingav - Sandbyv	15000
5	Lund	Tornav - Sölveg	13700
6	Helsingborg	Strandv - Johan Banérs g	11000
7	M-län	v 15 - v 23	12500
8	M-län	v 107 - v 109	6000
9	Hässleholm	Andra avenyen - Österg	12000
10	Stockholm	Odeng - Hälsingeg	18500
11	Stockholm	Farstav - Färnebo v	15000
12	Stockholm	Folkungag - Londonviadukten	33700
13	Eskilstuna	Sundbyv - Carlav	13000
14	D-län	E4 - v 218	9000
15	Norrköping	Ståthögav - Växelg	12000
16	Norrköping	Lidaleden - Hagebyg	11500
17	Västerås	E18 - (rampen)	27000
18	Västerås	Surahammarsv - Råbyleden	14500

1) Uppgifterna är lämnade av resp väghållande myndighet och skall avse 1973.

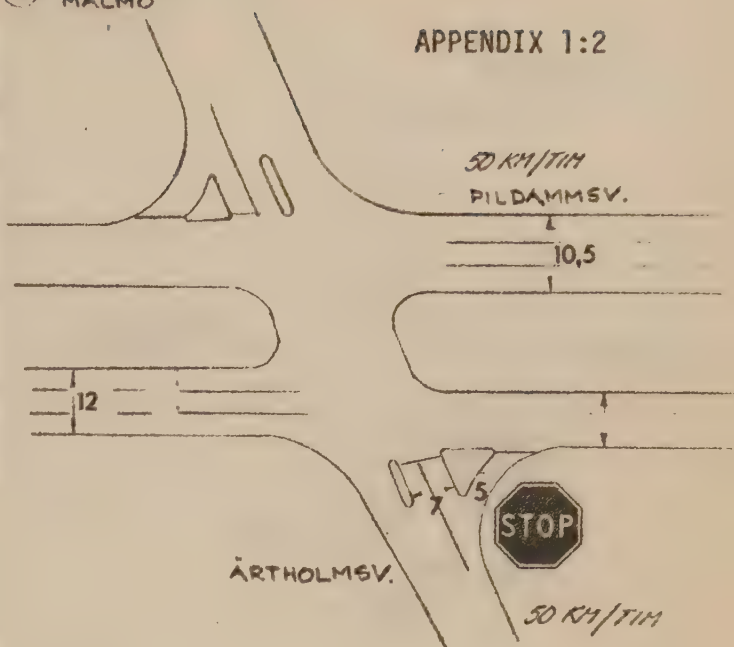
Mätplatsernas utformning och reglering framgår av sid :2 - :4.

① MALMÖ

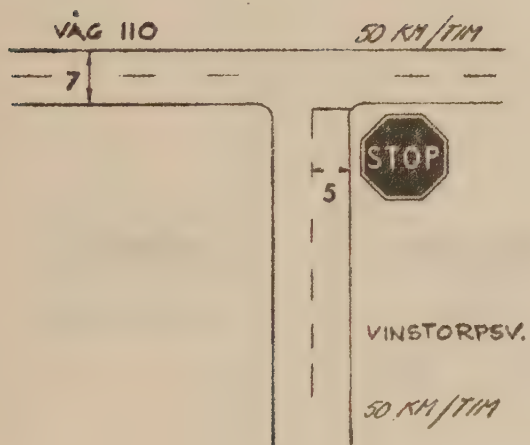


② MALMÖ

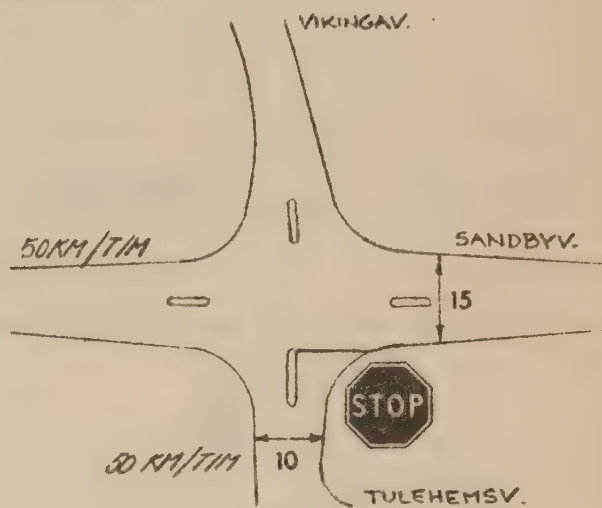
APPENDIX 1:2



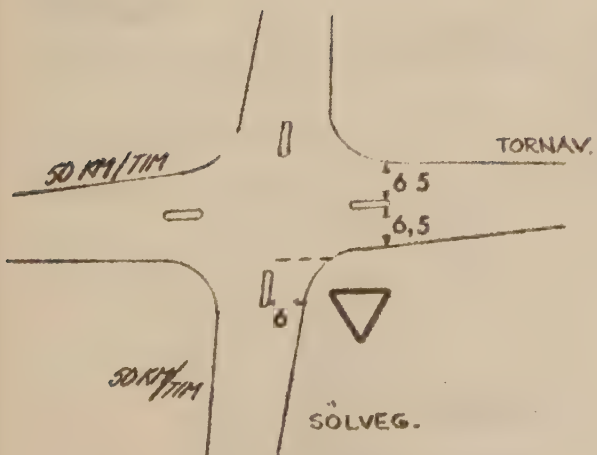
③ LOMMA



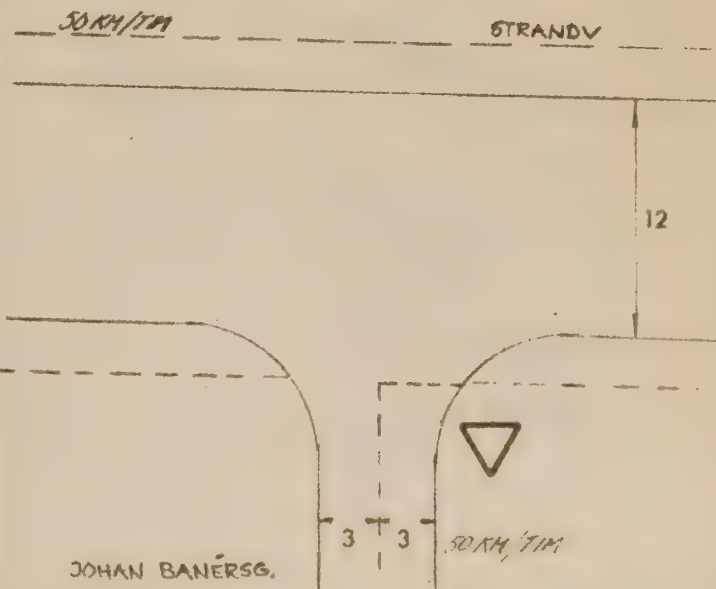
④ LUND



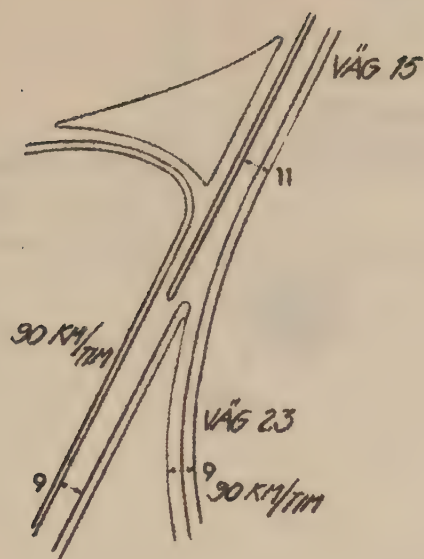
⑤ LUND



⑥ HELSINGBORG

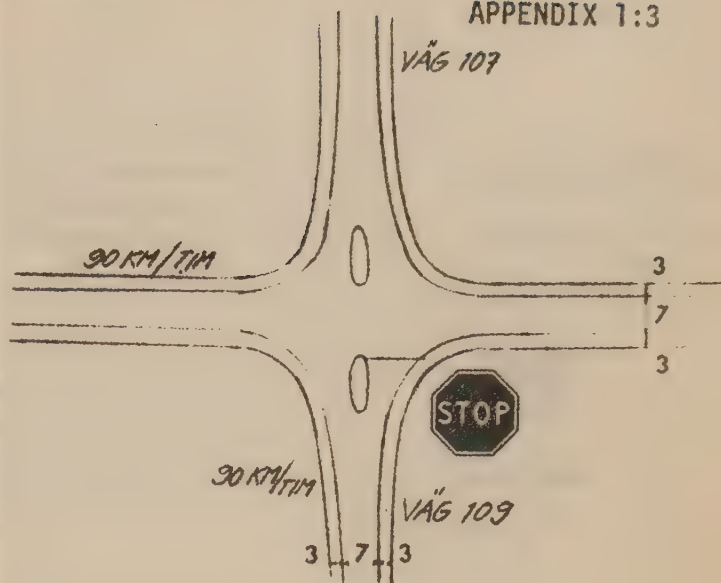


⑦ ROLSBERGA

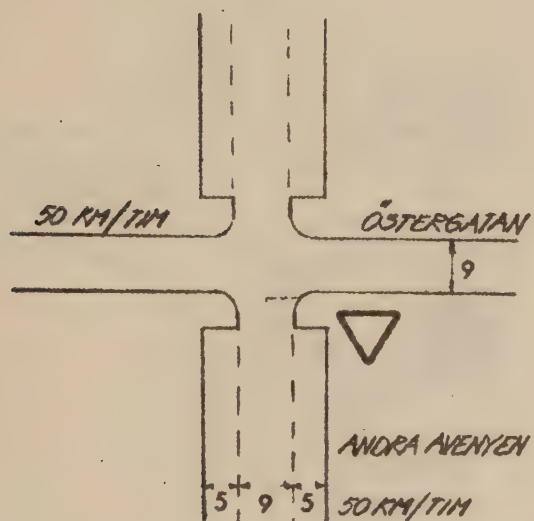


⑧ BJUV

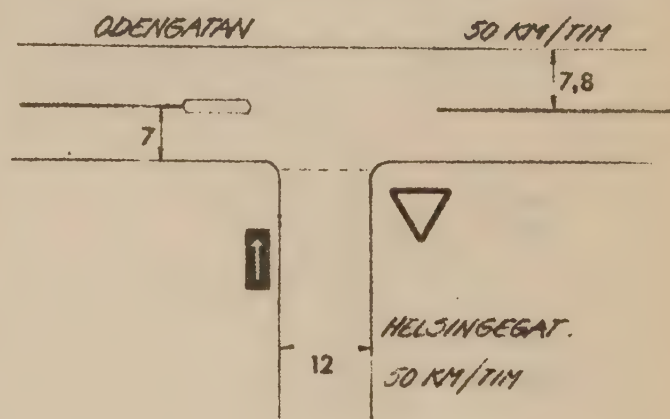
APPENDIX 1:3



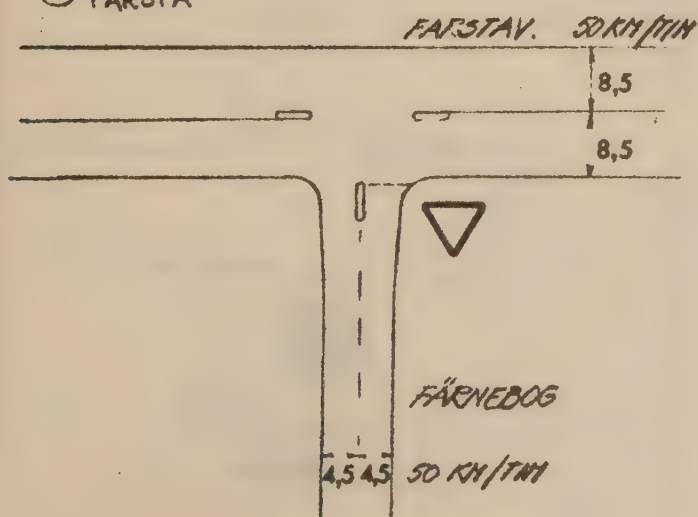
⑨ HÄSSLEHOLM



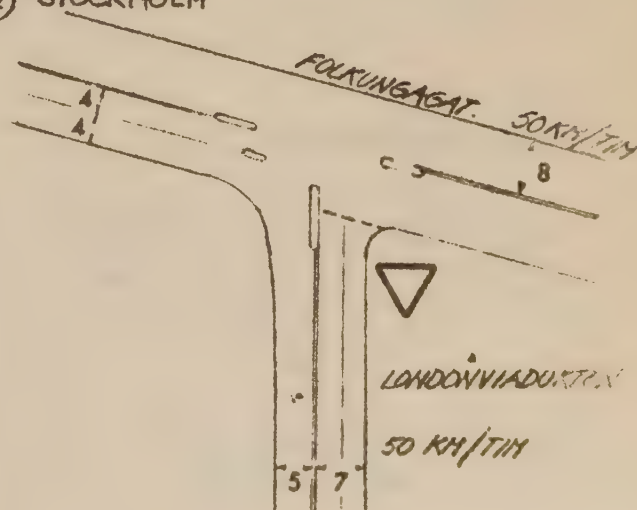
⑩ STOCKHOLM



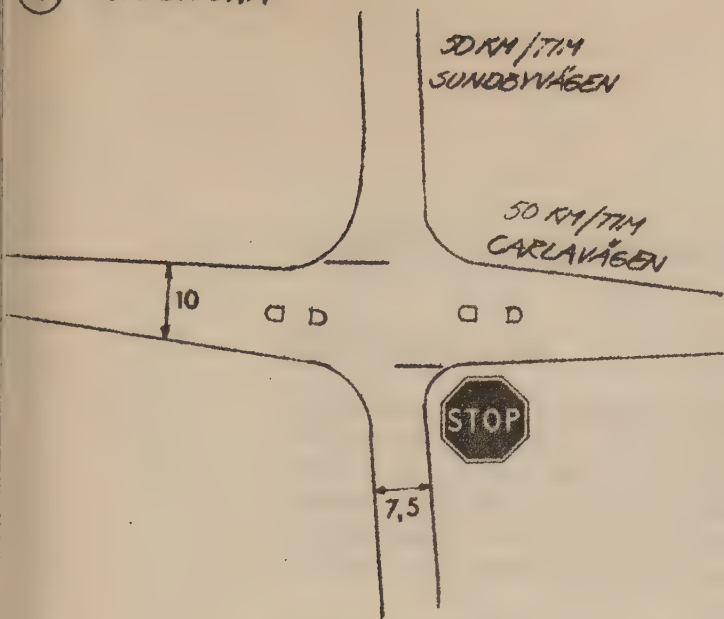
⑪ FARSTA



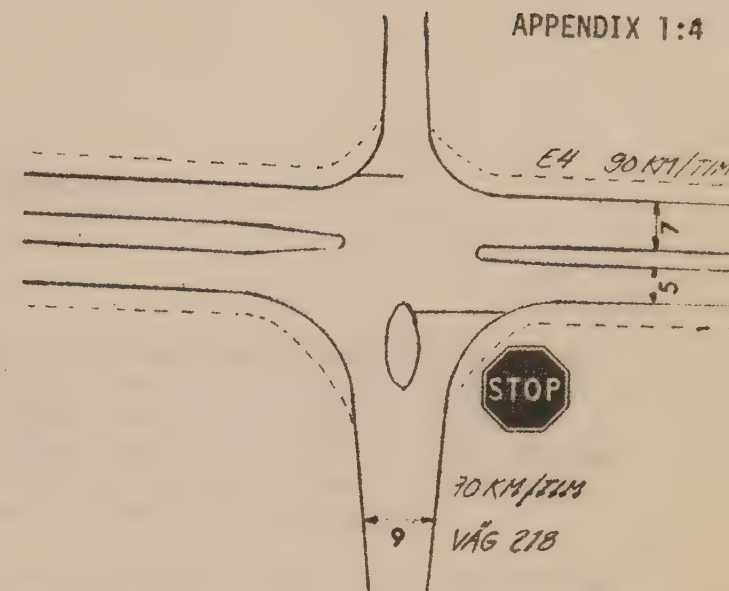
⑫ STOCKHOLM



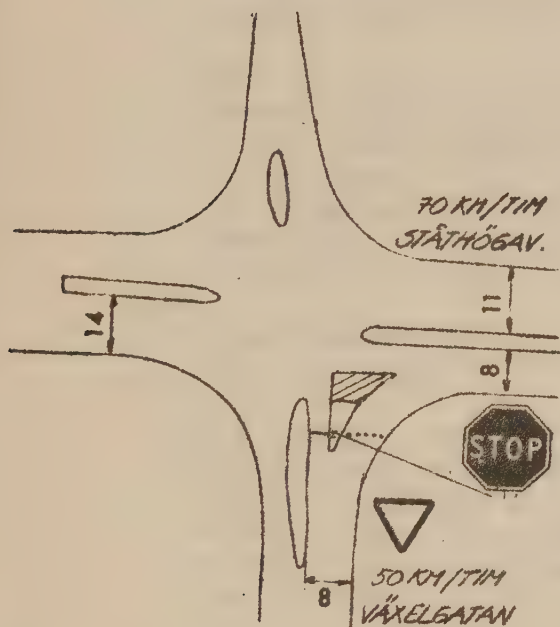
13 ESKILSTUNA



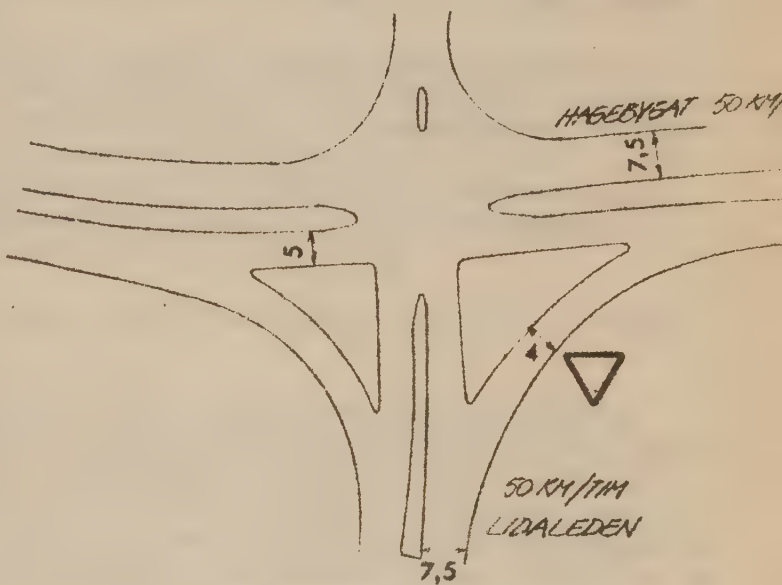
14 VAGNHÄRAD



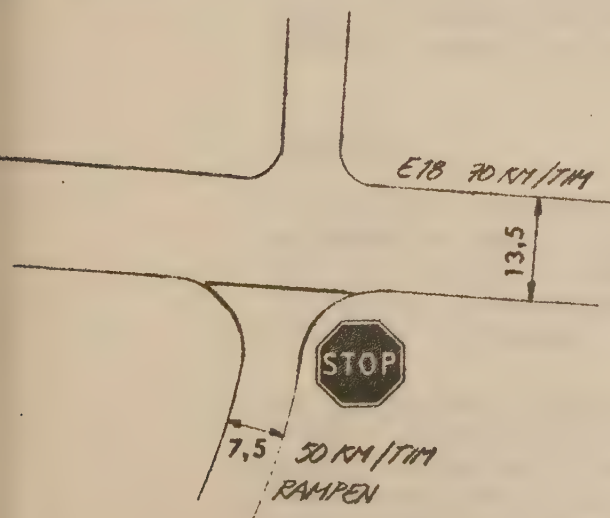
15 NORRKÖPING



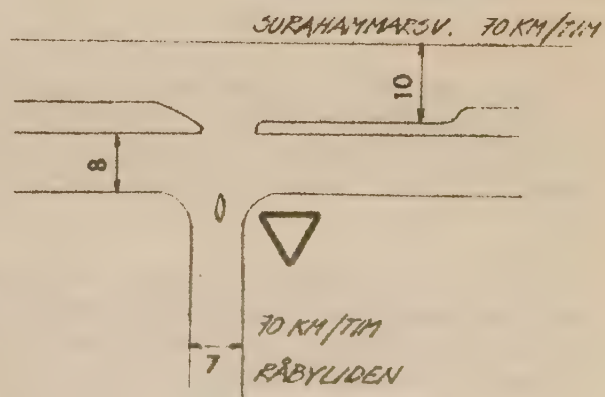
16 NORRKÖPING



17 VÄSTERÅS



18 VÄSTERÅS



APPENDIX 2 BESKRIVNING AV MÄTFÖRFARANDE

1 Mätutrustning

Som detektorer användes pneumatiska slangar med kontaktmembran, samt närvarodetektorer (induktionsslingor) av typ LME JCD 15. Slangar utnyttjades företrädesvis i de överordnade tillfarterna, i lägen där sannolikheten att ett fordon stannar över detektorn var liten. Därvid placerades som regel en slang per körfält, för att kunna identifiera pulser avseende samma fordon även vid parallella ankomster.

Närvarodetektorerna visades vid kontrollerade försök ha en hög driftsäkerhet, när störningar från närbelägna detektorer eliminerats, men en viss obestämthet i detekteringspunktens läge. I vissa fall finns också risk att cyklar detekteras, om de passerar slingan diagonalt. Utbalanseringstiden var tillräckligt lång för att endast en puls skall erhållas även vid största uppträdande fördröjningar för väntande fordon.

För att ytterligare öka tillförlitligheten användes som detektorer i de underordnade tillfarterna normalt en kombination av slang och induktionsslinga. Dessa samordnades, elektroniskt eller vid bearbetningen, så att en och endast en puls registrerades från slang och slinga mellan ett till- och ett frånslag på närvarodetektorn. Logiska, elektroniska enheter utvecklades också för att möjliggöra parallellkoppling av närvarodetektorer och för att eliminera fordon med felaktig körriktning.

Induktionsslingorna installerades normalt med måtten ca 1,5 x 1,5 m och på ca 20 mm djup.

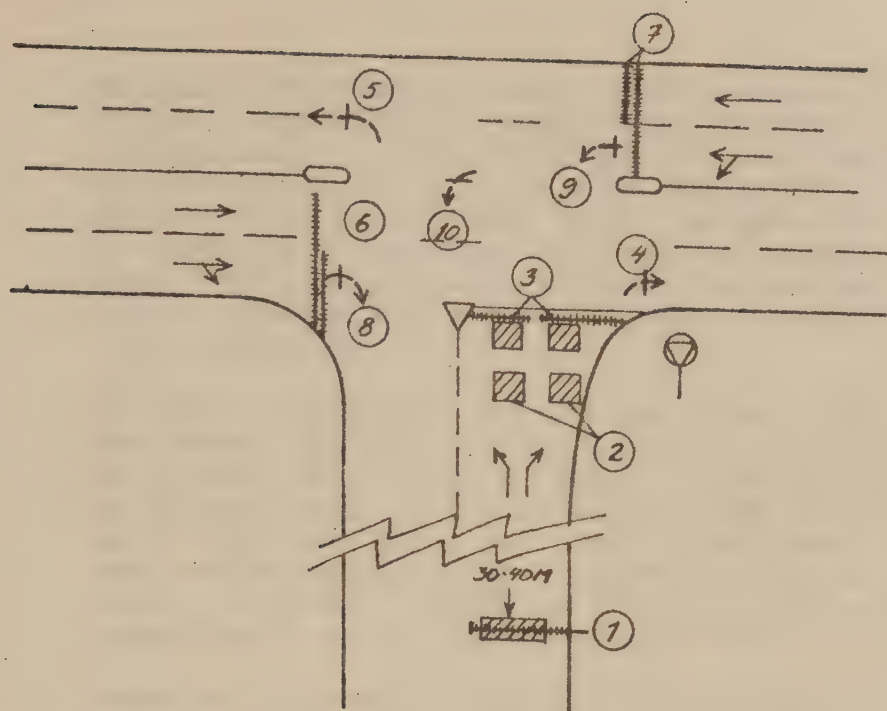
All insamlad information, manuell eller från automatiska detektorer, registrerades direkt på hållremsa via en datalogg av fabrikat TOLEC. Dataloggen är uppbyggd kring en Facit remsstans och har 20 binkar samt en digital ingång. Varje händelse (= t ex en puls från en detektor) registreras som ett kanalnummer, unikt för varje ingång, och en tidsangivelse med precision upp till 1 000-dels sekund. Den maximala kapaciteten, ca 10 händelser per sekund, var tillräcklig för mätningarna.

Data-loggen jämte detektorförstärkare och annan elektronik förvarades vid mätning i en husvagn, placerad invid korsningen och från vilken också de manuella observationerna gjordes. För strömförsörjning (12 V) användes omväxlande transformator och blyackumulator.

2 Mätmetod

Den använda mätmetoden varierades något från korsning till korsning, beroende på geometrisk utformning, förekomst av olika störningar, kör-sätt etc, dock med samma principiella uppläggning (samma definition av "accepterat tidsavstånd"). Denna princip illustreras av FIGUR 2:1, som avser ett typexempel.

Som regel placerades två närvarodetektorer efter varandra (på 2-3 m avstånd) i varje körfält i den underordnade tillfarten. Härigenom kan beaktas, i någon mån, benägenheten att sakta närma sig stopplinjen vid avvisandet av ett första tidsavstånd ("lag"), vid goda siktförhållanden. Vidare erhålls en exaktare beskrivning av de "lag", som börjar med att framförvarande fordon passerar ut i korsningen.



Alla tidsavstånd definieras som tidsavstånd mellan (hypotetiska) ankomster till en för varje kombination av under- och överordnade fordonströmmar definierad konfliktpunkt.

Beteckningar

Närvarodetektor

Pneum detektor

Manuell registrering av fordon rörelse

Funktion (ingång) nr - se tabell t h

1 Kombinerad detektor för mätning av fördröjning (fordon närmar sig korsningen).

2 Normal stopp-position för andra fordonet vid ev kö (till- och frångslag registreras).

3 Slangpuls före frångslag på närvarodetektor markerar utfart. Belagd närvarodetektor markeras väntande fordon.

4-5 Fordon lämnar korsningen (en manuell funktion/körriktning).

6-9 Fordonspassage i överordnad tillfart (en slang/körfält).

8-9 Manuell indikering av avsvängande.

10 Vänstersvägande fordon lämnar körbanahalvan.

FIGUR 2:1 Exempel på försökuppställning

De manuella funktionerna (4-9 i FIGUR 1) tjänar i allmänhet endast till att identifiera körriktningar och erfordrar ingen precision i tidsangivelsen. I sådana korsningar och för sådana körriktningar där ett väjningspliktigt fordon kan passera olika konfliktpunkter etappvis (t ex där mittremsa finns), markerar riktningsangivelsen för dessa fordon dock samtidigt också den tidpunkt då korsningen lämnas. Härigenom kan beaktas tidsavstånd som avvisas från en position i korsningen (vilka annars kommit att räknas som accepterade eller borttappats).

För vänstersvängande fordon från överordnad tillfart registreras både ankomst och avgång (funktionerna 7 + 9 resp 10 i FIGUR 1), den senare i regel manuellt. Dessa tidpunkter betraktas som slutet på ett resp början av nästa tidsavstånd för ett väntande fordon, som är väjningspliktigt och i konflikt med denna vänstersvängande fordonsström. Registrerades ej avgången (funktion 10), skulle kanske ett flertal tidsavstånd felaktigt registrerats som avvisande under den tid utfarten blockerades.

Ankomster i den underordnade tillfarten (funktion 1) registrerades oavsett körfält. Endast medelvärdet för fördröjningen kan därigenom mätas, genom en enkel in- och uträkning mellan olika snitt.

Ett antal andra funktioner tillämpades där förhållanden så krävde, som manuell indikering av korsande gång- eller cykeltrafik, in- eller avsvängande fordon mellan detektor (1) och korsningen, speciellt långsamma fordon etc.

För varje sammanhängande mätpass, å 20-30 minuter, indikerades dessutom tid för mätpassets början resp slut, ett unikt serienummer samt (ca 1 gång/minut) ögonblick vid vilka korsningen var tom. Den senare funktionen tjänar som kontroll och möjliggör en nedbrytning av mätpassen till kortare bearbetningsenheter.

APPENDIX 3 BESKRIVNING AV BEARBETNINGSPROGRAM

1 Inledning

ANAGAP är ett dataprogram för bearbetning av mätdata avseende accepterade tidsavstånd, fördröjning m fl karaktäristika för en tillfart i en korsning utan signalreglering.

ANAGAP är skrivet i Fortran V för ett UNIVAC 1108 system med en minneskapacitet av minst 60K.

2 Beskrivning

2.1 Funktion

ANAGAP utgår från en i tidsföljd ordnad lista av mätdata, där varje mätdata består av en händelsekod och en tidsangivelse. Varje händelsekod motsvarar en i indata beskriven händelsetyp, t ex passage av en detektor i viss position jämte en tidsangivelse (se 2.2.2). Som indata erfordras också en beskrivning av korsningen avseende fordonsströmmar i olika tillfarter och körfält, konfliktförhållanden mellan dessa fordonsströmmar etc jämte olika tidskonstanter (se 2.2.1).

Programmet tolkar och sorterar mätdata från en mätserie samt beräknar antal accepterade och avvisade tidsavstånd av olika typer och storlekar. I typindelningen skiljs mellan "gap", "lag" och följdttid samt mellan olika körriktningar. Storleksklassificeringen avser 0,5 sek intervall.

Dessa tabeller adderas upp för alla mätserier som önskas bearbetade, vilket anges i indata. För summatabeln görs en statistisk bearbetning avseende kritiska tidsavstånd jämte olika andra statistiska kriterier (se 2.3). De kritiska tidsavstånden beräknas med probit-analys och korrigeras för bias enligt Ashworth.

Såväl för varje mätserie som för samtliga bearbetade mätserier tillsammans beräknas också olika komponenter av fördröjningen för fordon från den underordnade tillfarten.

Varje bearbetning kan endast avse en underordnad tillfart men ett godtyckligt antal mätserier.

I ANAGAP finns inlagt ett flertal olika kontroller avseende logiken i mätdata. Eventuella fel skrivs ut för varje serie. Vid allvarliga fel inkluderas ej delar av eller hela den aktuella mätserien i bearbetningen.

2.2 Indata

2.2.1 Beskrivning av korsningen och mätmetoden

ANAGAP är tillämpligt för alla rimliga korsningstyper med 2-6 tillfarter, 1-4 körfält per tillfart och 1-3 körriktningar per tillfart. Konstruktioner

som separata körfält, övergångsställen, magasinutrymmen i korsningen, accelerationsramper etc kan beaktas.

Körfält definieras som separat detekterad del av tillfart. Detekteringen kan ske med induktionsslinga eller slangar. I det senare fallet kan kompenseras för axelantal med hjälp av inlästa tidskonstanter. Körriktning, för vilka separat körfält saknas, kan anges med t ex manuell detektor (eller slang) efter körfältsdetekteringen. Blockering av en eller flera körriktningar från underordnad tillfart kan anges med t ex närvarodetektorer eller mauellt (till/frånfunktion).

För den underordnade tillfarten förutsätts en speciell detektorkonfiguration med en eller två närvarodetektorer (till/från-funktioner) per körfält jämte eventuella ytterligare detektorer för mätning av fördröjning.

Konfliktförhållanden mellan olika fordonsströmmar läses in som en logisk matris, vars rader och kolumner betecknar olika fordonsströmmar från den underordnade tillfarten resp övriga tillfarter.

Mätningarna i en korsning disponeras i serier. Varje mätserie får ha ett obegränsat antal mätdata. I indata ges en lista på de mätserienummer bearbetningen skall avse.

2.2.2 Mätdata

ANAGAP förutsätter att mätdata finns formaterade på godtycklig input-fil (filnummer läses från kort). Formatet är fixerat till niosiffriga heltal, varvid de två första siffrorna avser händelsekod och de sju följande en tidsangivelse i godtycklig skala (skalfaktor inläses).

Dessa (högst 99) händelsekoder förutsätts motsvara binära händelser. Dessutom medges högst 10 händelsekoder med digital information, t ex datum och mätserienummer. Formatet för dessa är avpassat för TOLEC datalogg-system.

Beskrivningen av funktionerna motsvarande olika händelsekoder görs i problemdefinitionen (indata enligt 2.2.1 ovan). Numreringen är godtycklig.

För konvertering av information från dataloggen (t ex hållremsa) till formatat input för ANAGAP finns ytterligare ett dataprogram, RTM¹⁾. RTM är ett FORTRAN-program, utformat speciellt för TOLEC datalogg och Univac-anläggningen vid LDC samt baserat på lokala standardrutiner.

2.3 Utdata

För varje mätserie samt totalt för alla bearbetade serier erhålls en tabell över accepterade och avvisade tidsavstånd i olika storleksklasser, uppdelat på körriktning från underordnad tillfart samt på "gap" resp "lag".

Den statistiska bearbetningen av tidsavstånden görs endast på summatabellen med följande sammanställningar: totalt, alla "gap", alla "lag" samt "gap" + "lag" för varje körriktning. Följande statistik erhålls för

¹⁾ Programmet RTM är framtaget av civ ing Mikael Gedda, AB Vattenbyggnadsbyrån (VBB) Malmö

varje sådan sammanställning, avseende acceptansfördelningen: median, medelvärde, konfidensintervall för medelvärdet, standardavvikelse, korrektionsterm enligt Ashworth samt Chi-två kriterium för anpassningen till en logaritmisk normalfördelning.

Följdtidsavståndet, för fordon som accepterar ett lag efter ett framförvarande fordon, liksom betjäningstiden för varje fordon skrivs ut tabellerad i storleksklasser. Den totala fördröjningen samt olika komponenter därav skrivs ut som medelvärden, i den mån mätförfarandet medger sådana beräkningar. Dessa utskrifter erhålls såväl per mätserie som totalt.

För varje mätserie erhålls dessutom flöden i alla körriktningar, en lista på eventuella logiska fel i mätdata (felkod, händelsekod och tid) samt mätserienummer och mättid.

